

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

НДИКУМАНА ЭЛИАС

Геоинформационное управление гидрометеорологическими рисками в  
сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди

Специальность 1.6.20 – Геоинформатика, картография

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Е.П. Истомин

Санкт-Петербург

2024

## Оглавление

Введение .....	4
Глава 1. Анализ геоинформационной обстановки и разработка требований управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе .....	15
1.2. Социоэкономическая обстановка .....	20
1.3. Анализ климатической обстановки .....	22
1.3.1. Изменение времени года .....	24
1.3.2. Затопление сельскохозяйственных территорий .....	25
1.3.3. Воздействие изменения климата .....	26
1.3.4. Адаптация к изменению климата .....	27
1.4. Основные положения оценки гидрометеорологических рисков .....	31
1.4.1. Определение границ зоны риска .....	32
1.4.2. Сбор исторической информации о явлениях .....	33
1.4.3. Переход от феноменов к эталонным рискам .....	33
1.4.4. Выявление и определение приоритетных задач .....	36
1.4.5. Определение уязвимости .....	37
1.4.6. Оценка риска .....	39
1.4.7. Картографирование рисков .....	40
1.5. Разработка требования к геоинформационному управлению рисками .....	42
1.5.1. Основные понятия географической информационной системы (ГИС) .....	42
1.5.2. Исторические сведения о ГИС .....	43
1.5.3. Географическая информация (ГИ) .....	43
1.5.4. Основные компоненты геоинформационной системы .....	44
1.5.5. Основные функции ГИС .....	44
1.5.6. Области применения геоинформационных систем .....	45
1.5.7. Свойства геоинформационных систем .....	46
1.5.8. Типы данных в ГИС .....	46
1.5.9. Метод получения географической информации .....	47
1.5.10. Понятие базы географических данных .....	49
Выводы по главе 1 .....	53
Глава 2. Модель оценки рисков .....	55

2.1. Параметрическая модель оценки гидрометеорологических рисков в сельскохозяйственном секторе республики Бурунди.....	55
2.2. Разработка параметрической модели управления гидрометеорологическими рисками .....	63
Выводы по главе 2 .....	67
Глава 3. Методика управления гидрометеорологическими рисками .....	68
3.1. Анализ спутниковых данных .....	68
3.2. Анализ гидрометеорологических данных .....	77
3.3. Статистический анализ данных .....	90
Выводы по главе 3 .....	101
Глава 4. Модель геоинформационной системы управления гидрометеорологическими рисками в республике Бурунди .....	104
4.1. Основные компоненты модели геоинформационной системы управления гидрометеорологическими рисками в республике Бурунди.....	104
4.2. Геоинформационное веб-приложение.....	111
4.3. Оценка эффективности модели .....	117
4.4. Рекомендации по применению геоинформационной модели для управления рисками в сельскохозяйственном секторе в качестве инструмента принятия решений и обработки полученных результатов.....	119
Заключение .....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	126
<i>Приложение А</i> .....	140
<i>Приложение Б</i> .....	157
<i>Приложение В</i> .....	160
<i>Приложение Г</i> .....	162
<i>Приложение Д</i> .....	164
<i>Приложение Е</i> .....	166

## Введение

*Актуальность исследования.* Сельскохозяйственный сектор является основанием роста национальной экономики в Бурунди и во многих странах. Он является гарантом продовольственной безопасности населения. В Бурунди сельскохозяйственный сектор представляет собой натуральное хозяйство, которое ведут мелкие производители, потребляющие большую часть своей продукции и лишь 15% из которой продают на рынке. Фермеры по-прежнему используют примитивные орудия труда и имеют очень ограниченный доступ к средствам производства. Кроме того, почва становится все менее плодородной, земельная собственность раздроблена, доступ к кредитам затруднен, а уровень бедности среди сельского населения высок.

Почти 85% из 27 834 км<sup>2</sup> – потенциально сельскохозяйственные земли, 43% из которых находятся под постоянными посевами. Из-за пересеченного рельефа страны климат здесь тропический, влажный и жаркий на низких высотах, умеренный и влажный в горах. Сельскохозяйственная деятельность характеризуется двумя дождливыми сезонами, что позволяет выращивать три урожая.

Сельское хозяйство Бурунди является одним из самых слабых в регионе, что обусловлено методами его ведения, плохо приспособленными к условиям текущего времени. К падению производства добавляется низкая продуктивность сельскохозяйственных земель. По мнению опрошенных фермеров, основными проблемами, влияющими на урожайность, являются невозможность оставить землю под паром, невозможность получения достаточного количества органического навоза и фрагментация земель. Сельскохозяйственные технологии все еще очень примитивны, по-прежнему используются ручные орудия труда, а применение современных средств производства минимально. Кроме того, высокий уровень эрозии и падение плодородия почв еще больше снижают низкий уровень производительности труда. Так, по данным FAO и Африканского банка развития, урожайность

основных сельскохозяйственных культур в стране является одной из самых низких в регионе. Из двух с половиной миллионов гектаров земли около миллиона гектаров обрабатывается крестьянами. 400 тысяч гектаров используются государством для сельского хозяйства. 7 тысяч гектаров используются для выращивания экспортных культур, 200 тысяч гектаров покрыты лесами и 126 тысяч гектаров – солончаками и болотами. Земельный вопрос в Бурунди является одним из основных препятствий для роста сельскохозяйственного сектора и развития страны. Бурунди занимает второе место в Африке по плотности населения (после Руанды), в среднем 297 жителей на квадратный километр, но в наиболее густонаселенных районах, таких как север, запад и центр страны, этот показатель может достигать 500 жителей на квадратный километр. Крестьяне имеют в среднем 0,4 гектара земли, но эта площадь постоянно находится под угрозой сокращения. Это уже произошло в наиболее населенных регионах (Буензи, Киримири, Мумирва), где средний размер фермы составляет 0,5 гектара. При этом 7% населения уже не имеют земли для сельскохозяйственной деятельности.

По данным Всемирного банка и Министерства охраны окружающей среды, сельского хозяйства и животноводства Бурунди, изменение климата представляет собой серьезную угрозу для страны, поэтому необходимо срочно устранить совокупные риски, возникающие в результате ухудшения последствий изменения климата.

Бурунди чрезвычайно подвержена последствиям изменения климата, которые вызывают такие стихийные бедствия, как наводнения, засуха, проливные дожди, оползни и т.д.

В связи с изменением климата многие районы Бурунди уже сталкиваются с более частыми, сильными и продолжительными засухами. Засуха – это необычный и временный дефицит доступной воды из-за недостатка осадков и повышенного испарения (из-за высоких температур).

Засухи часто влияют, например, на сельское и лесное хозяйства, водные ресурсы и биоразнообразие. Они снижают уровень воды в реках и грунтовых

водах, замедляют рост деревьев и сельскохозяйственных культур, способствуют нападению вредителей и возникновению пожаров.

С другой стороны, в сезон дождей (с февраля по май) увеличение количества осадков в течение длительных периодов времени в основном приводит к наводнениям, в то время как короткие, интенсивные ливни могут вызвать дождевые наводнения.

Наводнение – распространенное стихийное бедствие в Бурунди, которое, наряду со штормами, за последние десятилетия стало причиной гибели людей, нанесло ущерб миллионам людей и привело к значительным экономическим потерям.

Учитывая, что изменение климата оказывает негативное влияние на национальную экономику и, в частности, на сельскохозяйственную деятельность, в данной работе будет рассмотрена возможность использования параметрической модели, которая позволит предсказать поведение различных параметров, определяющих засуху и наводнения, решить проблемы, связанные с изменением климата и, в частности, с засухой и наводнениями.

Поскольку одним из важнейших условий выращивания сельскохозяйственных культур в Бурунди является изменение температур и количества осадков, данное исследование было основано на погодных условиях, необходимых для роста растений [105].

**Актуальность проблемы.** Понимание изменчивости и изменения климата представляет собой сложную научную задачу. Технологический прогресс, в таких областях как космические наблюдения, высокая вычислительная мощность, картографические средства и телекоммуникационные системы, позволил создать необходимые инструменты для понимания климатической системы и определения ее рисков.

Службы информации о погоде и климате необходимы для определения и оценки вариантов снижения и управления риском потерь и ущерба, а также для мониторинга их эффективности. Ранний и постоянный диалог с различными пользователями этих услуг может помочь обеспечить полезность данных и

информации для принятия решений. Более эффективное усвоение данных, например, детерминированных прогнозов прохождения циклонов, может сыграть решающую роль в улучшении процесса принятия решений. Однако во многих наименее развитых странах (НРС) службы метеорологической и климатической информации существенно отстают в развитии. Более того, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в последние годы, метеорологические службы хорошо развиты, а те, которые предназначены для принятия долгосрочных мер, распространены не так широко.

Несмотря на значительные достижения в области климатологии и метеорологии, многие виды экономической деятельности по-прежнему страдают от последствий изменения климата, хотя и обладают данными краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования погоды. Так, можно привести недавний пример Бурунди в 2013 и в 2014 годах. В ночь с 9 на 10 февраля 2014 г. в Бужумбуре и окрестностях прошел сильный дождь (с 20.00 до 23.30 9 февраля выпало до 80 мм осадков). Дождь вызвал значительный сток воды, оползни, эрозию и сильное наводнение, что привело к приостановке ряда видов экономической деятельности. Дожди также привели к выходу из берегов рек Гикома и Ньябагере и затоплению равнины, прилегающей к озеру Танганьика. Более 80% ущерба пришлось на коммуны Бутерере, Исале, Каменге, Кинама и Мутимбузи. Обрушилось около 1 000 домов, был уничтожен крупный рынок, 20 000 человек остались без жилья, зарегистрировано 77 смертей. Что касается инфраструктуры, то в результате стихии были повреждены дороги, мосты, сети питьевого водоснабжения и электроснабжения, а также два рынка.

Для понимания подверженности и уязвимости к опасным климатическим явлениям необходимы подробные социально-экономические данные и понимание того, как риски влияют на средства к существованию и состояние здоровья людей, а в более общем плане – на среду их обитания и особенно на сельскохозяйственный сектор. Отметим, что многие из этих данных не всегда поддаются количественной оценке. В рамках оценки подверженности

климатическим угрозам необходима модель географической информационной системы, позволяющая прогнозировать и пространственно представлять показатели риска на основе метеорологических данных. Технология и продукты геопространственных данных могут обеспечить понимание взаимосвязи между рисками, подверженностью и уязвимостью.

Несмотря на значительный прогресс, прогнозирование краткосрочных (дни – недели – месяцы – годы) экстремальных погодных явлений все еще остается лакуной в оценках природных и климатических рисков. Более того, в зависимости от величины различных метеорологических параметров некоторые виды сельскохозяйственной деятельности могут пострадать, а некоторые – не испытывают никакой опасности. Исходя из вышесказанного, очевидно, что прогноза погоды недостаточно для минимизации всех рисков, поэтому необходима модель, позволяющая прогнозировать показатели риска в зависимости от установленных уровней метеорологического параметра, при превышении которых риск подлежит анализу.

В данной работе предлагается использовать уже известные стохастические модели, позволяющие прогнозировать состояние параметров технической системы к геосистеме. В частности, существуют одно- и многопараметрические модели, основанные на марковских процессах, которые предсказывают вероятность того, что эти параметры не выйдут за заданные пределы. Таким образом, необходимо рассмотрение возможности использования описанных моделей для прогнозирования рисков, связанных с различными метеорологическими параметрами, и их адаптация к реальным условиям. Результаты, полученные с помощью данной модели, предполагается использовать при создании геоинформационной системы для прогнозирования и управления георисками, а сама модель может быть использована для прогнозирования краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных показателей риска в зависимости от заданного уровня, за пределами которого риск должен быть определен.



**Цели диссертационной работы** – минимизация влияния природных явлений на урожайности в республике Бурунди на основе прогнозирования гидрометеорологических рисков.

**Объект исследования** – система управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди.

**Предмет исследования** – технологии и модели геоинформационного управления рисками в сельскохозяйственных районах Бурунди.

**Основные задачи исследования:**

1. анализ гидрометеорологической обстановки в Республике Бурунди;
2. разработка требований управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди;
3. статистический анализ параметров, влияющих на возникновение гидрометеорологических рисков в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди;
4. разработка параметрической модели управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди;
5. разработка информационной системы обеспечения принятия решений на основе гидрометеорологических рисков.

**Методы исследования.** Решение поставленных в диссертации задач базируется на современных методах научного исследования:

1. обобщение и анализ существующего опыта моделирования динамики природных явлений;
2. системный анализ и концептуальное моделирование;
3. аналитические исследования;
4. математическое моделирование;
5. прогнозирование;
6. эксперимент.

**Положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Требования к геоинформационному управлению гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди.

2. Параметрическая модель оценки гидрометеорологических рисков в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди.

3. Методика представления геоданных модели прогнозирования гидрометеорологических рисков в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди.

4. Модель геоинформационной системы управления гидрометеорологическими рисками в Республике Бурунди.

***Научная новизна:***

– обоснованы требования к геопространственному представлению сельскохозяйственных регионов Республики Бурунди на основе многопараметрического анализа характеристик геоинформационных систем и сформулированы приоритетные направления экономического развития Бурунди;

– сформулированы методики пространственного представления геоданных для сельскохозяйственных регионов Бурунди;

– впервые разработаны принципы управления стихийными бедствиями для регионов Бурунди, основанные на модели управления рисками с использованием геоинформационной системы;

– впервые разработана модель оценки риска для природной геосистемы с недостаточной (ограниченной) информацией о параметрах ее состояния. Для анализа состояния параметров геосистемы в заданный момент времени используются вероятностные характеристики случайного процесса, описывающего поведение параметров системы, на основе знания текущего состояния этих параметров;

– впервые разработана модель, позволяющая прогнозировать коэффициент ущерба, на основе статистических характеристик параметров текущего момента для сельскохозяйственных регионов Республики Бурунди.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Полученные научные результаты соответствуют пунктам 3, 6, 7, 11, 12, 20, 18, 21 и 23 паспорта научной специальности 1.6.20. «Геоинформатика и картография».

**Практическая и научная значимость работы** заключается в том, что значимая научно-техническая задача управления георисками решена путем применения модели геоинформационной системы, разработанной для управления рисками в области сельскохозяйственной деятельности.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что предложенные модель и методика позволяют улучшить сельскохозяйственную деятельность в Бурунди, поскольку дают возможность заранее принимать решения по минимизации потерь, связанных с рисками, вызванными опасными природными явлениями, обусловленными последствиями изменения климата.

**Апробация работы:**

1. XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 16-28 февраля 2022 г.);

2. Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационное развитие информационных систем и технологий в гидрометеорологии» (Санкт-Петербург, 12 апреля 2022 г.);

3. Международная научно-практическая конференция молодых ученых «ИНФОГЕО 2023: Информационные системы в Арктике». (Санкт-Петербург, 7 ноября 2023 г.).

**Личный вклад автора.** Кандидат участвовал в подготовке основных документов, необходимых для проведения исследования, принимал участие в обработке данных и в разработке модели геоинформационной системы, участвовал в анализе полученных результатов и в составлении документов,

необходимых для публикации полученных результатов в различных научных журналах.

**Публикации.** Результаты исследования опубликованы в 4 статьях в научно-технических изданиях, из них 3 статьи – в рецензируемых журналах из рекомендованного перечня ВАК Министерства образования и науки РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка используемых сокращений и 6 приложений. Объем работы составляет 167 страниц, 38 рисунков, 7 таблиц, 32 формулы. Список использованной литературы включает 112 источников.

**Во введении** обозначены объект, предмет, задачи и цель исследования, представлена актуальность и научная новизна работы, ее практическая и теоретическая значимость, краткое содержание диссертации по главам, перечислены положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ географического и экономического положения Республики Бурунди; проанализированы основные проблемы экономического сектора; сформулированы основные приоритеты развития экономического сектора страны; проанализировано положение сельскохозяйственного сектора, животноводческого сектора и транспортного сектора; определены основные проблемы, стоящие перед экономикой Бурунди; сформулированы рекомендации, необходимые для повышения общеэкономического уровня страны.

С помощью средств географической информационной системы был проведен анализ рельефа Бурунди с целью выявления его географических особенностей. Также использовались пространственные данные о количестве осадков и температуре для выявления регионов, уязвимых к климатическим условиям. Используя результаты, полученные с помощью ГИС, на основе рельефа Бурунди были определены регионы, наиболее подверженные определенным климатическим угрозам, таким как наводнения, засуха и эрозия.

На основе результатов, полученных при базовом анализе пространственного распределения некоторых гидрометеорологических параметров, отмечена актуальность управления природными рисками. Сформулированы требования к использованию модели геоинформационной системы для минимизации рисков, угрожающих экономическому сектору.

Вторая глава посвящена изложению принципов работы модели. Данная модель оценки рисков основывается на анализе исторических данных и, используя их статистические характеристики, прогнозирует основные показатели риска. Используя язык программирования VBA, удалось применить на практике данную модель и в качестве примера рассчитать показатели риска, связанные с гидрометеорологическими параметрами.

Во третьей главе проведен статистический анализ гидрометеорологических данных, на которых основаны исследования. Анализ проводился в основном по данным о температуре воздуха и осадках. Для анализа использовались коэффициент автокорреляции, коэффициент корреляции между осадками и температурой, критерий t-Стьюдента, среднеарифметическое и среднеквадратическое отклонения. На основе результатов анализа были сформулированы требования к их использованию для достижения цели исследования.

Четвертая глава посвящена разработке модели геоинформационной системы для прогнозирования георисков. Данная модель разработана с использованием математической модификации для прогнозирования вероятности наступления события, вызывающего появление катастрофических последствий. Эта модель анализирует поведение параметров в текущий момент времени и, используя их статистические характеристики, прогнозирует вероятность наступления риска, когда значение этого параметра превысит уровень, за которым можно ожидать стихийных бедствий. Также представлены основные компоненты этой модели и принцип их работы.

С помощью современных научных методов была проверена оценка результатов, полученных с использованием данной модели, и сформулированы

необходимые рекомендации по ее применению для предотвращения последствий стихийных бедствий и минимизации потерь от таких опасных природных явлений, как эрозия, засуха, наводнения и т.д.

В заключении обосновываются выводы и рекомендации, вытекающие из результатов диссертационной работы, и определяются дальнейшие направления исследования.

# **Глава 1. Анализ геоинформационной обстановки и разработка требований управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе**

## **1.1. Анализ геофизической и климатической обстановки Республики Бурунди**

Бурунди расположена между 28°58' и 30°53' восточной долготы и между 2°15' и 4°30' южной широты. На севере она граничит с Руандой, на западе – с Демократической Республикой Конго (ДРК), на юге и востоке – с Танзанией. Его площадь составляет 27834 км<sup>2</sup>, из которых около 2000 км<sup>2</sup> занимает берингийская часть озера Танганьика [105].

Рельеф Бурунди очень разнообразен. Страна разделена на 5 эко-климатических регионов. С запада на восток расположены низменность Имбо, соответствующая провальной впадине Западной рифтовой долины, крутой район Мумирва, горная область (хребет Конго – Нил), центральные плато и впадины Кумосо (Kumoso) и Бугесера (Bugesera). Высота над уровнем моря колеблется от 774 м на берегах озера Танганьика до 2670 м на горных хребтах, постепенно снижаясь до 1200 м на востоке страны [105].

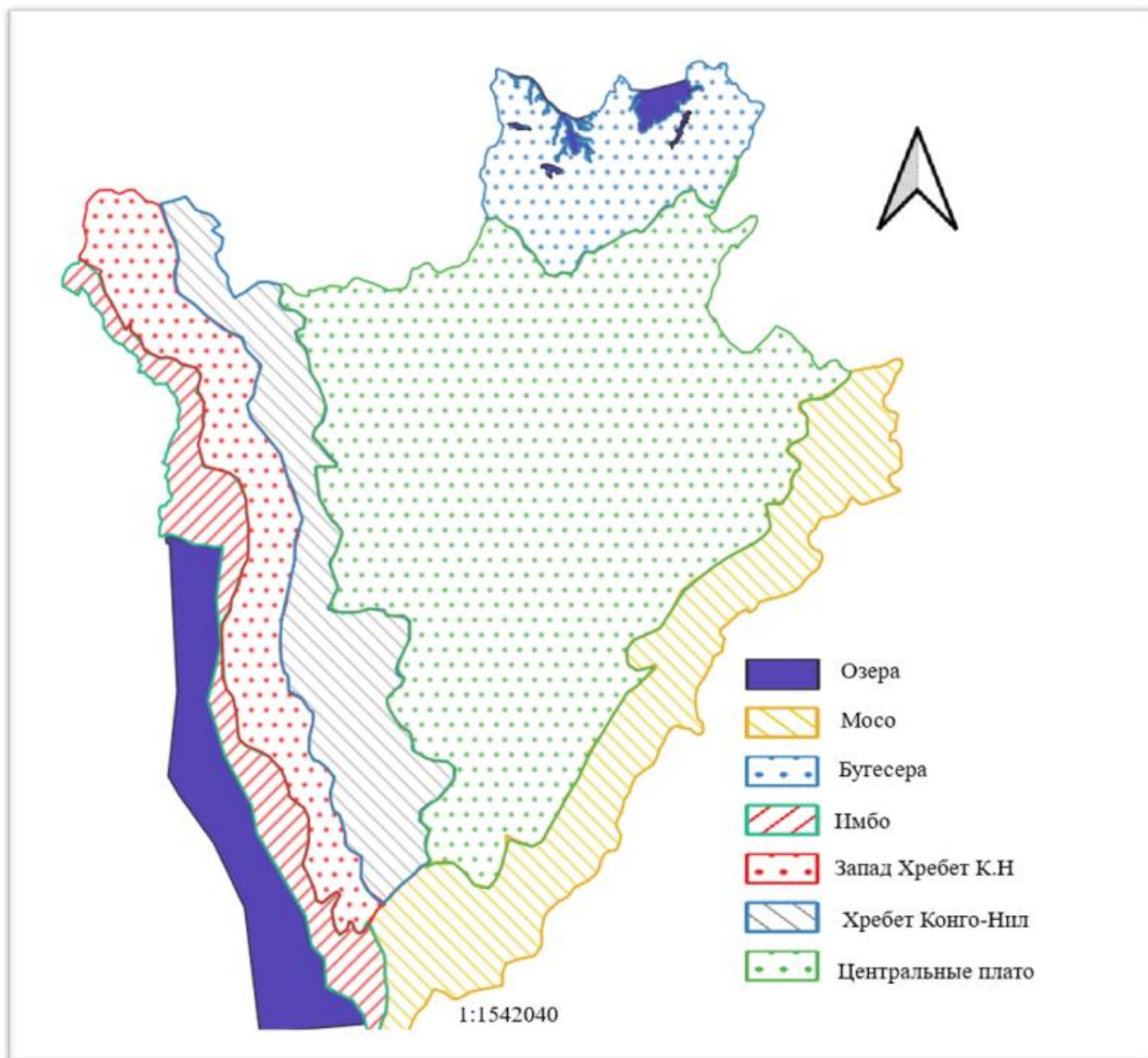


Рис.1.1. Карта эоклиматических регионов Бурунди.

Низменность Имбо простирается до западной границы Бурунди, образуя ряд равнин различной ширины от Танзании на юге до Руанды на севере. Низменность образована равниной Русизи и равнинами, примыкающими к озеру Танганьика. Высота над уровнем моря колеблется от 774 м (уровень озера Танганьика) до 1000 м у начала прибрежных уступов [105, 111].

Равнина Русизи делится на две части: равнину Нижней Русизи (Rusizi) на юге и равнину Средней Русизи на севере. Равнины, примыкающие к озеру Танганьика (Tanganyika), лежат к югу от нижней части Русизи. В общем рельефе преобладает чередование небольших осадочных равнин различной



ширины (от 0 до 20 км), расположенных на фоне высокого рельефа. При достаточном удалении этих равнин образуются равнины весьма больших размеров. Первая – равнина Ньянза-Лак (Nyanza-Lac), стекающая по реке Руаба (Rwaba), шириной 16 км. Вторая – равнина Румонге (Rumonge). Она вдвое меньше первой, но длиннее и простирается от Ньунгве (Nyungwe) на юге до севера Дамы (Dama). Третья находится к югу от Бужумбуры. Самая широкая ее часть занята местом расположения экономической столицы [105, 111].

Регион Мумирва (Mumirwa) представляет собой уступ, усеянный очень узкими хребтами, пересекаемыми многочисленными бурными реками, стекающими с вершин на равнины. Склоны очень круты и изменчивы. Высота над уровнем моря увеличивается от 1 000 м до почти 2 000 м, от равнин Русизи до хребта Конго – Нил (Congo-Nil) на расстоянии от 3 км между озером и массивом Батога до 30 км к северу от средней равнины Русизи.

Хребет Конго – Нил – это вершина горста, связанная с грабенем, занятым озером Танганьика, и низменностью с крутым расчлененным склоном, образующим уступы Мумирва. Хребет Конго – Нил формирует асимметричный и неравномерный рельеф Бурунди. Он возвышается над озером Танганьика более чем на 1000 м. На востоке он соединяется с центральными плато без четких уступов. Протянувшись с севера на юг Бурунди, он фактически берет начало у подножия горного массива Вирунга на севере Руанды, определяя водораздел между бассейнами рек Конго и Нил. Ориентация хребта Конго – Нил различна. В северной части он образует дугу, опирающуюся на русло реки Русизи и берега озера Танганьика. К югу он поворачивает на северо-запад-юго-восток, неизменно следуя ориентации берегов озера Танганьика.

Центральные плато занимают большую часть территории страны. Они включают территорию между хребтом Конго – Нил на западе и впадиной Кумосо (Kumoso) на востоке, а также между массивом Инанзерве-Кибимби (Inazegwe-Kibumbu) на юге и бассейном Бугезера на севере. Высота над уровнем моря колеблется от 1 350 м в долине реки Рувубу до чуть более 2 000 м

в нескольких точках на западе и юге. Однако почти весь регион лежит на высоте от 1500 до 1850 м над уровнем моря [105].

Центральные плато состоят из плосковершинных холмов, расположенных по отдельности или чаще связанных между собой кластерами, образующими группы из двух-трех, четырех, а иногда и пяти единиц. Они разделены широкими плоскодонными долинами, заболоченными, но все чаще осушаемыми для сельскохозяйственных нужд [105].

Впадина Кумосо (Kumoso), в которой доминируют массив Нкома и возвышенность Руйиги, имеет протяженность более 160 км и ширину от 10 до 30 км. Долины рек Малагарази (Malagarazi), Румпунгве (Rumpungwe) и их притоков образуют ее восточные границы с Танзанией. Высота над уровнем моря колеблется от 1125 м в месте выхода реки Малагарази из Бурунди до чуть менее 1400 м на крайнем юге. Кумосо образует длинную равнину, наклоненную с запада на восток, которая продолжается в Танзанию в профиле, симметричном пограничному тальвегу (talweg) [105].

Впадина Бугесера простирается на севере Бурунди, занимая более 700 км<sup>2</sup> национальной территории и продолжаясь в Руанду. С юга и востока она ограничена возвышенностями центральных плато, с запада – рекой Каньяру, с севера – озерами Рверу и Чохоха, а с северо-востока – реками Кагера и Ньябаронго. За исключением нескольких холмов, поднимающихся примерно до 1550 м, высота над уровнем моря не превышает 1500 м. Самые низкие участки занимают озера Рверу и Чохоха, по которым проходит граница между Руандой и Бурунди. Берега рек и озер представляют собой заболоченные участки с обилием папируса [105].

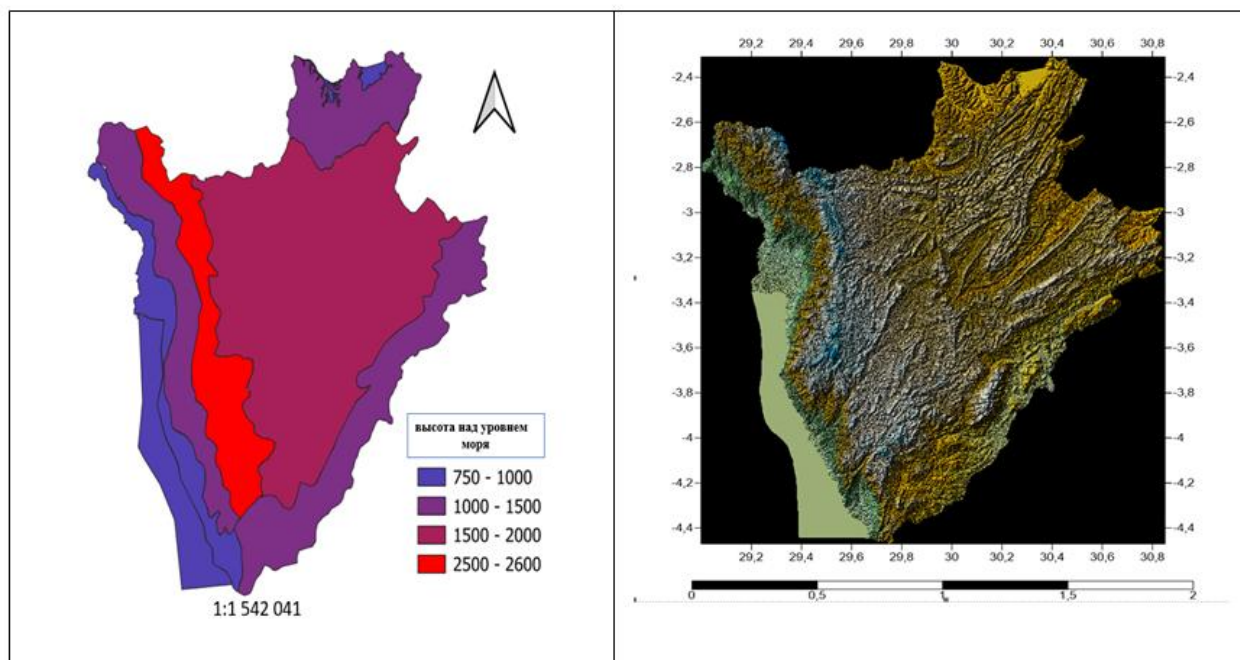


Рис. 1.2. Рельеф Бурунди.

Благодаря рельефу Бурунди климат меняется в зависимости от высоты над уровнем моря, что обуславливает значительное геоклиматическое разнообразие (таб. 1). Климат Бурунди – влажный тропический, на который влияет высота над уровнем моря, варьирующаяся от 773 до 2670 м. Для него характерно чередование сезона дождей, который обычно длится с октября по май, и сухого сезона – с июня по сентябрь. В целом количество осадков увеличивается с высотой над уровнем моря. Минимальное количество осадков составляет около 500 мм на равнине Русизи, а максимальное достигает 2 200 мм на больших высотах. Среднее количество осадков для Бурунди составляет 1 274 мм. Наибольшее количество дождливых дней приходится на апрель (от 16 до 26) [103, 105, 111].

Среднегодовая температура воздуха уменьшается с увеличением высоты над уровнем моря. Самая высокая среднегодовая температура составляет 24,1°C (равнина Имбо), а самая низкая – 15,6°C (Рвегура). Среднемесячные максимальные температуры наиболее высоки в конце сухого сезона (сентябрь-октябрь), а среднемесячные минимальные температуры наиболее низки в сухой сезон [103, 105, 111].

Распределение количества осадков и температуры в зависимости от высоты над уровнем моря в Бурунди [105]

Эоклиматические регионы	Процент от общей площади поверхности	Высота над уровнем моря (в метрах)	Температура среднегодовая (°C)	Среднегодовое количество осадков (мм)
Низменность Имбо	7	800 – 1100	Выше 25 °C	800 – 1100
Регион Мумирва	10	1000 – 1700	18 °C – 28 °C	1100 – 1900
Хребет Конго – Нил	15	1700 – 2500	14 °C – 15 °C	1300 – 2000
Центральные плато	52	1350 – 2000	17 °C – 20 °C	1200 – 1500
Впадина Кумосо	16	1100 – 1400	20 °C – 23 °C	1100 – 1550

## 1.2. Социоэкономическая обстановка

Бурунди – одна из самых густонаселенных стран Африки, плотность населения которой составляет более 290 человек/км<sup>2</sup>. Население преимущественно сельское. Уровень урбанизации, по оценкам, составляет около 10,4 % [64, 103].

Основу экономики Бурунди составляет сельское хозяйство, на долю которого приходится почти 80 % экспортных поступлений и почти 50 % ВВП. Ведение натурального хозяйства зависит от погодных условий, и поэтому крайне уязвимо к изменению климата [64, 103].

Правительство Бурунди присоединилось к Целям развития тысячелетия. Оно определило долгосрочные рамки политики экономического и социального развития в рамках концепции «Бурунди 2040» как развивающейся страны и «Бурунди 2060» как развитой страны, заявив о своей готовности проводить активную экологическую политику с целью обеспечения устойчивого

управления природными ресурсами, адаптации к изменению климата и содействия сокращению выбросов парниковых газов [64, 103].

В краткосрочной перспективе основные направления экономического и социального развития Бурунди определены в Стратегической рамочной программе роста и сокращения бедности второго поколения [62]. В этих рамках правительство страны намерено снизить воздействие изменения климата, в частности, путем реализации приоритетных мер, изложенных в Национальной стратегии и плане действий по адаптации к изменению климата, которые заключаются в следующем:

- поглощение парниковых газов путем лесовосстановления;
- охрана существующих лесных массивов и восстановление растительного покрова;
- распространение методов сбора дождевой воды для сельскохозяйственных и бытовых нужд;
- внедрение противоэрозионных систем на чувствительных территориях;
- создание резервных зон в долине озера Танганьика и вокруг озер Бугесера;
- выявление и распространение засухоустойчивых видов деревьев;
- расширение посевов продовольственных культур короткого срока выращивания;
- управление динамикой водотоков и смерчей в Мумирве, в том числе в городе Бужумбура;
- обучение и информирование лиц, принимающих решения, и других заинтересованных сторон, включая местные сообщества, о методах адаптации к изменчивости климата;
- принятие мер по агрометеорологическому и климатологическому мониторингу загрязнения воздуха и деградации природной среды.

Одной из основных проблем, стоящих перед Бурунди, является продолжающаяся деградация природных ресурсов и окружающей среды, которая негативно влияет, в частности, на сельскохозяйственное производство, приводя к периодическим голоданиям. Это явление усугубляется последствиями изменения климата, поэтому правительство страны стремится принять национальную политику, стратегию и план действий по борьбе с последствиями изменения климата для населения, социально-экономических секторов и природных экосистем, чтобы способствовать устойчивому развитию [62, 110].

### **1.3. Анализ климатической обстановки**

Бурунди уже несколько десятилетий обеспокоена проблемами, связанными с изменением климата, которое, как правило, проявляется в длительных засухах, угрожающих продовольственной безопасности, и обильных осадках, вызывающих наводнения, в результате которых наносится значительный ущерб социально-экономической инфраструктуре, посевам в низменных районах, жилью и здоровью людей. По этой причине страна очень рано присоединилась к другим государствам мира в борьбе с изменением климата, ратифицировав 6 апреля 1997 г. Рамочную конвенцию ООН об изменении климата [57].

С этого момента при поддержке Глобального экологического фонда Бурунди подготовила и представила на рассмотрение Конференции сторон Первое национальное сообщение в 2001 г. и Второе национальное сообщение в 2010 г. в соответствии со статьей 12 Рамочной конвенции ООН об изменении климата. В этих двух документах, в частности, отражены: уровень выбросов парниковых газов в Бурунди и то, как он будет изменяться в случае непринятия каких-либо мер; конкретная политика и меры по снижению выбросов парниковых газов и адаптации к изменению климата, которые страна намерена принять или уже приняла, и их влияние на снижение выбросов и развитие

соответствующих секторов, а также предложения по проектам, которые должны быть представлены в механизмы финансирования [57].

Поддержка со стороны Глобального экологического фонда (ГЭФ) также позволила Бурунди осуществить мероприятия по наращиванию потенциала, в том числе: национальную самооценку потенциала, который необходимо укрепить для глобального управления окружающей средой; разработку национального плана по адаптации к изменению климата; наращивание потенциала для повышения качества инвентаризации парниковых газов; разработку стратегии и плана действий по устойчивому управлению земельными ресурсами [104].

В 2012 г. при поддержке Общего рынка Восточной и Южной Африки Бурунди приступила к разработке Национальной политики в области изменения климата, которая является базовой основой для учета изменений климата во всех секторах социально-экономической жизни страны. В этой политике изложены видение, принципы и стратегические ориентиры, определенные правительством, а также механизмы ее реализации, в частности, соответствующая институциональная база [104, 108].

Проведенные исследования эволюции климатических параметров Бурунди до 2050 г. на основе модели общей циркуляции показывают, что среднегодовая температура повысится на 1 – 3°C [87, 103, 104].

Тенденции изменения количества осадков показывают, что до 2050 г. общее количество осадков увеличится на  $\pm 10$  %. Межгодовые колебания, наблюдаемые сегодня, скорее всего, сохранятся и даже увеличатся. Если говорить конкретнее, то структура осадков будет нарушена, и в стране будет существовать только два основных сезона, каждый из которых будет длиться шесть месяцев: сезон дождей – с ноября по апрель и сухой сезон – с мая по октябрь. Таким образом, короткий сезон дождей с сентября по ноябрь исчезнет. [87, 103, 104].

Эти изменения климата в Бурунди приведут к возникновению множества рисков, связанных со следующими явлениями:

- изменение сезонов;
- затопление (наводнение) болот и низменностей;
- деградация земель и потеря плодородия почв.

### 1.3.1. Изменение времени года

Некоторые регионы Бурунди подвержены риску длительной засухи. К ним относятся регион Бугесера на севере страны и северная равнина Имбо на западе. За последние два десятилетия регион Бугесера уже сталкивался с периодами резкого ухудшения климатических условий, что привело к падению сельскохозяйственного производства, а затем – к голоду и миграции населения в другие страны [87, 103, 104].

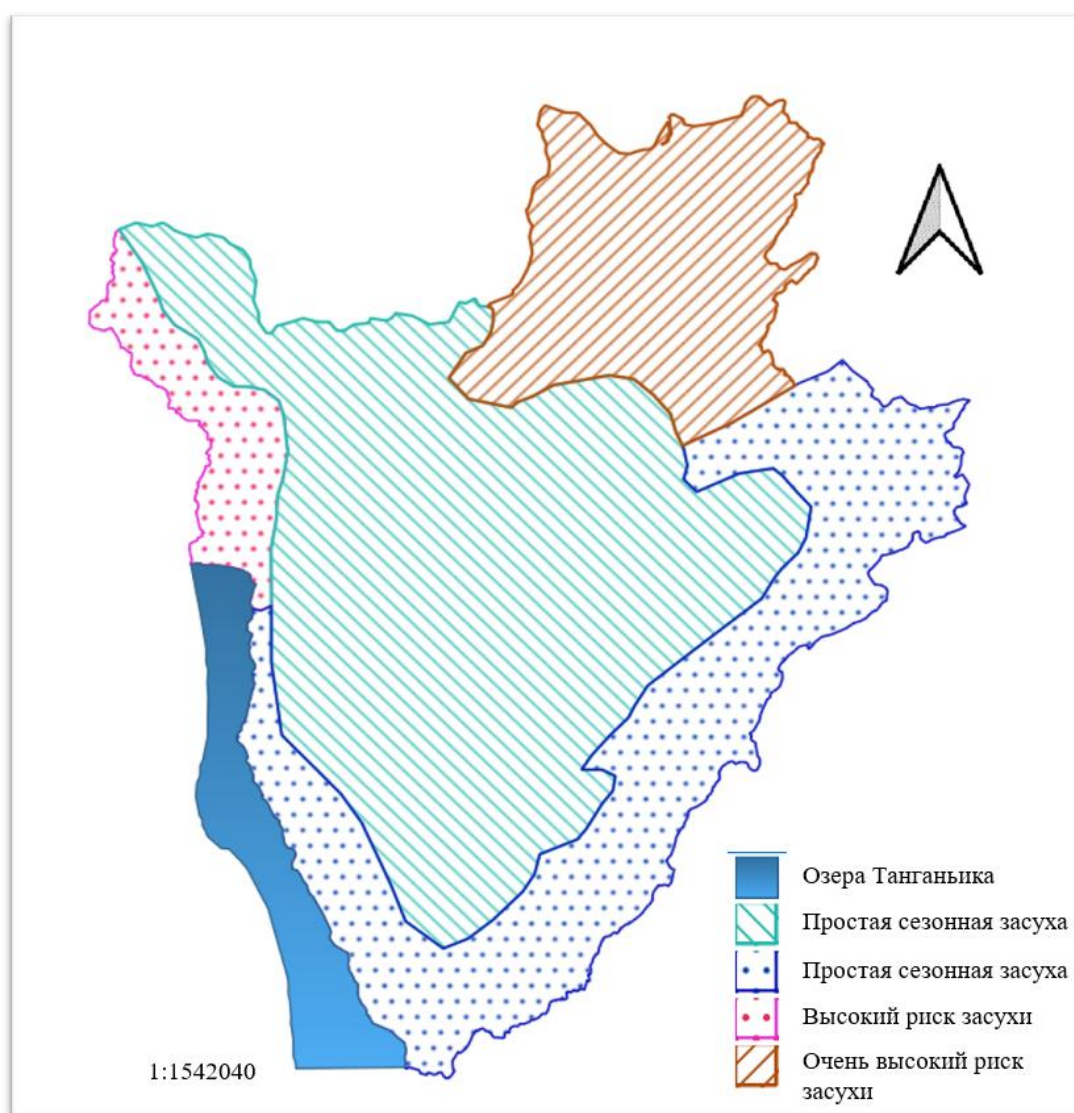


Рис. 1.3. Карта уязвимых мест к засухе.



Для решения проблемы последствий гидрометеорологических рисков Бурунди пытается оказать экстренную помощь пострадавшим за счет государственных средств, а также путем поощрения коллективных солидарных действий на внутреннем уровне и обращения за поддержкой к международным донорам. Правительство страны также рассматривает более устойчивые варианты выхода из данной ситуации и планирует развивать крупномасштабную ирригацию, продвигать национальную систему сбора и сохранения дождевой воды и использовать ее для сельскохозяйственных и бытовых нужд. Кроме того, правительство стремится разработать современные методы управления любыми стихийными бедствиями, чтобы минимизировать или даже остановить потери, вызванные различными природными катастрофами [87].

### **1.3.2. Затопление сельскохозяйственных территорий**

В Бурунди болота занимают площадь 117 993 га, более 60 % которой, согласно «Схеме управления болотами в Бурунди», используется в основном под сельское хозяйство. Только 18 750 га болот, или 16 % от общей площади, освоены с использованием современных технологий. Посевы на болотах регулярно уничтожаются проливными дождями, которые часто идут в начале сезона дождей и нарушают гидрологический режим рек [87, 93, 103].

В районе Мумирва, выходящем на равнину Имбо, реки являются бурными. Во время дождей они несут большое количество твердых частиц, которые выливаются в озеро Танганьика. В результате разрушается социально-экономическая инфраструктура, особенно в городе Бужумбура, а также посевы на равнине Имбо. В 2010 г. затраты на восстановление оврагов и некоторых объектов общественной инфраструктуры в городе Бужумбура составили 12 913 900 000 бурундийских франков, или около 8 600 000 долларов США [87, 93, 103].

В регионе Мумирва также происходят многочисленные оползни, разрушающие дороги и затрудняющие передвижение людей и грузов. Следует

также отметить, что основные объекты инфраструктуры для производства гидроэлектроэнергии расположены на реках, протекающих по этому региону, и их водохранилища находятся под угрозой чрезмерного заиливания, что приведет к высоким эксплуатационным расходам и, соответственно, к увеличению цены на производимую электроэнергию (кВт-ч) [17, 93].

В связи с увеличением количества осадков, прогнозируемым на 2050 г., оползни, наводнения, уничтожение урожая, социальной и экономической инфраструктуры могут усилиться, что рискует подорвать амбиции страны в области устойчивого развития. Однако правительство Бурунди решительно настроено на решение этой проблемы и считает защиту водосборных бассейнов одной из приоритетных задач. Чтобы справиться с надвигающимися проблемами, необходимо провести исследования для поиска устойчивого решения. Среди методов, которые могут помочь остановить последствия, можно выделить современные технологии управления гидрометеорологическими рисками, методы ирригации и сохранения плантаций для их последующего использования [17, 93].

### **1.3.3. Воздействие изменения климата**

Изменение режима выпадения осадков и повышение температуры окажут негативное влияние на источники средств к существованию населения Бурунди. К числу наиболее уязвимых секторов относятся энергетика, сельское хозяйство и животноводство, лесное хозяйство, водные ресурсы, природные экосистемы и здравоохранение [42, 87].

Последствия изменения климата приведут к следующим эффектам:

- сокращение сельскохозяйственного производства в результате снижения урожайности из-за усиления эрозии и потерь урожая, вызванных наводнениями и продолжительной засухой. В результате все большее число семей будет продолжать страдать от отсутствия продовольственной безопасности, а плохое питание постепенно превратиться в реальную проблему здравоохранения в Бурунди;

– снижение рыбопродуктивности в результате изменения экологической обстановки в озерах, связанной с повышением температуры воды и ее загрязнением избыточным поступлением осадков, удобрений и других продуктов, используемых в сельском хозяйстве, а также промышленных отходов;

– постоянный дефицит энергии для населения и отраслей экономики в результате деградации лесов и лесополос, а также падение выработки на гидроэлектростанциях из-за отсутствия достаточного количества воды в водохранилищах;

– ухудшение здоровья населения в результате распространения заболеваний, вызванных антисанитарными условиями после наводнения и повышения температуры (холера, малярия, брюшной тиф и др.);

– высокая частота оползней в результате более обильных и интенсивных осадков, что приведет к разрушению различных инфраструктур и уничтожению сельскохозяйственных культур.

#### **1.3.4. Адаптация к изменению климата**

Традиционно бурундийцы, являющиеся по сути земледельцами, всегда старались адаптироваться к климатическим изменениям с помощью определенных приемов, таких как: чередование сроков посева для предотвращения потерь из-за опасных климатических явлений; выращивание клубней (маниок, сладкий картофель и др.), более устойчивых к экстремальным климатическим условиям; хранение урожая в зернохранилище для обеспечения продовольственной безопасности каждой семьи; сохранение генетических ресурсов в виде колосьев или сухих семян; практика посадки саженцев для предотвращения потерь из-за опасных климатических условий).

С конца 1970-х г. правительство Бурунди при поддержке партнеров по развитию приступило к реализации программы лесовосстановления с использованием экзотических пород деревьев (эвкалипта, сосны, каллитриса и гревиллеи). К сожалению, эти усилия были пресечены кризисом 1993 г., в

результате которого было уничтожено около 30 тыс. га лесных массивов. Кроме того, в регионах Бугесера и Кумосо экстремальные условия засухи и наличие термитов привели к тому, что усилия по лесовосстановлению часто заканчивались неудачей. После гражданской войны в Бурунди вновь были приложены значительные усилия к программе лесовосстановления, однако значительная часть лесов находится под угрозой пожара [42, 91, 102].

Для решения проблем продовольственной безопасности при одновременной адаптации к неблагоприятным климатическим условиям в Бурунди начаты проекты по освоению обводненных участков для выращивания риса на равнине Имбо, а также освоены болота в других регионах для распространения выращивания риса на возвышенностях [56, 91, 102].

В настоящее время в Бурунди разработаны и утверждены национальные планы развития, содержащие ряд приоритетных мероприятий, способствующих адаптации к изменению климата. В основном это следующие планы: Национальный план действий по адаптации к изменению климата (НПДАИК) [104]; План действий по комплексному управлению водными ресурсами (ПДКУВР) [101]; Национальная программа инвестиций в сельское хозяйство (НПИСХ) [102]; Национальная сельскохозяйственная стратегия (НСС); Национальная стратегия и план действий по охране биологического разнообразия (НСПДОБР); Национальная стратегия и план действий по ликвидации деградации почв [56, 91, 101].

Наиболее важные моменты всех этих планов можно обобщить следующим образом:

- обновление системы сбора метеорологических и гидрологических данных;
- оценка ресурсов подземных вод Бурунди с целью быстрого восполнения существующих недостатков для поддержки комплексного планирования;
- развитие гидрологического моделирования водосборных бассейнов как важного шага, помогающего оценить возможности имеющихся ресурсов

для удовлетворения текущих и будущих потребностей и поддержки планирования;

- разработка системы оценки рационального управления экосистемами Бурунди;

- разработка системы оперативного управления рисками, связанными с изменением климата;

- подготовка высококвалифицированного персонала в области борьбы со стихийными бедствиями;

- создание системы предупреждения и предотвращения стихийных бедствий;

- обучение и информирование лиц, принимающих решения, и других заинтересованных сторон, включая местные сообщества, о методах адаптации к изменению климата;

- создание и обеспечение функционирования системы сбора данных, их обработки в базе данных и распространения.

Несмотря на достигнутый значительный прогресс, прогнозирование краткосрочных (дни – недели – месяцы – годы) экстремальных погодных явлений все еще остается пробелом в оценках природных и климатических рисков. Потребность в улучшенной информации о погоде и изменении климата для оценки риска различных опасностей и последующего принятия решений на основе фактических данных как никогда велика. Для оценки гидрометеорологических рисков необходима комплексная интеграция информации о погоде и климате, поскольку атмосферные и океанические движения климата и экстремальные погодные явления, которые они могут породить, взаимосвязаны. Потенциальное увеличение частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений в результате изменения климата и роста населения в уязвимых районах только усиливает эту необходимость [90, 97, 109].

Прогнозирование оценки воздействия изменчивости климата в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе и их взаимосвязи с

экстремальными погодными явлениями позволит получить перспективную и полезную для принятия решений информацию, которая может быть включена в планирование и управление рисками [90, 97, 109].

Большинство пунктов, определенных в различных стратегических планах, остаются теоретическими, а практическая база для управления природными рисками в значительной степени отсутствует из-за недостаточности новых технологий, нехватки специалистов по управлению рисками и финансовых ресурсов, необходимых для внедрения определенных методов.

В целом, основные проблемы в области управления рисками, несмотря на уже имеющиеся стратегические планы, заключаются в следующем:

*1. Ограниченный потенциал для адаптации к климатическим рискам и управления ими*

Бурунди весьма уязвима к изменению климата и пока не располагает адекватной системой прогнозирования погоды и заблаговременного предупреждения. Для ее адаптации и поиска решений ей придется использовать инновационные методы с учетом нехватки финансовых ресурсов и необходимых технических навыков.

*2. Недостаточный организационный потенциал*

В борьбе с изменением климата участвуют несколько партнеров. Однако климатические риски еще недостаточно хорошо известны всем заинтересованным сторонам, тем более, что они пока не учитываются в отраслевой политике и планах действий. Необходимы институциональные реформы, чтобы обеспечить учет климатических изменений во всех политиках устойчивого развития Бурунди [90, 109].

*3. Слабый потенциал в области научно-исследовательских работ и передачи технологий*

Бурунди не обладает техническими и финансовыми ресурсами для проведения исследований и разработок в области изменения климата и не имеет национальной программы, специализирующейся на управлении рисками и их прогнозировании. Что касается внедрения доступных на коммерческой основе

адаптационных технологий, то основным препятствием остается высокий уровень бедности, в результате чего эффективные методы/технологии остаются недоступными для бурундийского населения.

#### *4. Недостаток финансовых ресурсов для реализации проектов по адаптации к изменению климата и управлению георисками*

Как уже отмечалось выше, большинство мер адаптации к рискам, вызванным изменением климата, определенных в уже разработанных национальных и отраслевых планах действий, не были реализованы из-за нехватки финансовых ресурсов. Это связано, очевидно, с ограниченными способностями участников борьбы со стихийными бедствиями (государственных структур, частного сектора, гражданского общества и местных органов власти) разрабатывать приемлемые проекты и вести переговоры о финансировании в рамках существующих механизмов [90, 97, 102, 109].

#### **1.4. Основные положения оценки гидрометеорологических рисков**

Помимо организационного аспекта управление гидрометеорологическими рисками – это еще и вопрос оценки и прогнозирования неопределенностей, связанных со случайным характером природных явлений и их возможных последствий, поэтому очевидно, что для эффективного управления рисками необходимо глубокое научно-техническое понимание различных составляющих риска. Эти научные знания основаны как на оперативных, так и на фундаментальных исследованиях. Оно объединяет большое научное сообщество, состоящее из геологов, геотехников, гидрологов, климатологов, географов и т.д., целью которого является прогнозирование рисков через их возможные последствия во времени и пространстве. Этот фундаментальный подход к качественной и количественной оценке рисков состоит из диагнозов и сценариев, базирующихся в основном на опыте, полученном после катастроф. При этом используется широкий спектр данных, инструментов и методов – от полевых наблюдений до высокотехнологичного

численного моделирования, выполняемого высококвалифицированным персоналом [59, 75, 97].

Оценка риска подразумевает анализ, в том числе количественный, и, прежде всего, пространственный анализ различных составляющих риска. Она предполагает комплексный анализ, основанный на следующих этапах [75]:

- прогнозирование рисков;
- определение границ зоны риска и периметра исследования;
- сбор, описание и картографическая расшифровка исторических и современных явлений;
- классификация и картирование уровней опасности;
- определение эталонной опасности, от которой необходимо защититься или для которой необходимо измерить риск;
- выявление и определение приоритетности социально-экономических и гуманитарных задач (оценка рисков);
- характеристика различных видов уязвимости (факторы, критерии, индикаторы);
- при необходимости измерение возникшего риска с помощью индексов риска или потенциальных потерь (количественная оценка риска).

#### **1.4.1. Определение границ зоны риска**

Для увеличения количества информации об исторических событиях и повышения значимости процесса экспертной оценки важно анализировать рисковые явления в рамках однородной физической единицы, подверженной их возникновению. Эта единица, которую можно назвать базой опасности или, соответственно, базой риска, может быть ограничена гидрографическим, орографическим, геологическим или морфологическим контекстом, в котором факторы, приводящие к возникновению опасности или вызывающие ее, относительно схожи. Например, определенная область стока в случае опасности «затопления» или определенный карстовый массив в случае опасности «обрушения подземных полостей» [96].



### **1.4.2. Сбор исторической информации о явлениях**

Знание и определение местоположения исторических или современных явлений являются фундаментальными предпосылками для оценки опасности. Традиционно такая информация собирается из архивов и от местных жителей в виде свидетельств о нанесенном ущербе. В случае, например, движения грунта она может быть дополнена полевыми исследованиями и дешифрованием аэродинамических или спутниковых снимков высокого разрешения с целью выделения и локализации морфологических проявлений, характерных для определенных явлений (скопления, изолированные блоки и т.д.), и признаков недавней активности (нарушения растительности и инфраструктуры, заболоченных участков) [71].

### **1.4.3. Переход от феноменов к эталонным рискам**

С теоретической точки зрения компонент риска воспринимается через вероятность возникновения явления заданной величины (или интенсивности) в заданный период. Правила сочетания различных факторов и параметров, участвующих в этом определении, сильно варьируются в зависимости от природных явлений и используемых подходов (например, детерминистского или геостатистического). Они могут использоваться для определения нескольких уровней риска, оцениваемых, как правило, по качественной шкале (от низкого до высокого). Например, в случае с наводнениями оценка риска включает критерии, связанные с масштабами явления (высота и продолжительность затопления, скорость течения), что облегчает работу с трудно прогнозируемыми явлениями, такими как большинство ливневых паводков. Пороговые значения между различными уровнями наводнения определяются в зависимости от потенциальных последствий для различных видов деятельности человека (сельского хозяйства, транспорта, животноводства и т.д.) [71, 96].

Например, в случае наводнения высота в один метр является пороговым значением для разграничения среднего и высокого уровней, при которых:

- ребенок не может двигаться;
- автомобиль не может хорошо двигаться;
- обычные спасательные средства уже не могут использоваться;
- защита с помощью дамбы частным лицом становится затруднительной.

Однако в зависимости от опасности не всегда удастся определить пороговые значения на основе критериев потенциального ущерба, и тогда их разделение становится достаточно условным.

Для некоторых сложных опасных явлений (подвижки грунта, землетрясения и извержения вулканов и др.) классификация опасности может включать несколько критериев, соответствующие веса которых оцениваются с помощью различных геостатистических методов [71, 98].

В случае землетрясений региональная опасность рассчитывается с помощью сложных вероятностных моделей, объединяющих влияние всех землетрясений, источники которых перечислены. На местном уровне это так называемое сейсмическое микрорайонирование. При оценке сейсмической опасности учитываются различные эффекты потенциальных землетрясений. В ее основе лежит гораздо более натуралистический подход, основанный на эмпирическом сочетании предрасполагающих факторов [98].

Однако при оценке риска необходимо учитывать и его прогнозируемое пространственное распространение, особенно в случае таких высокодинамичных явлений, как оползни, цунами или наводнения. В таких случаях для разграничения рисков и составления динамической карты для нескольких сценариев возникновения и распространения опасности можно использовать цифровое или физическое моделирование (с использованием масштабных моделей). Многочисленные компьютерные модели и инструменты могут использоваться для прогнозирования пространственных и временных масштабов явления, а также изменения определенных параметров, таких как:

скорость, объем, кинетическая энергия или высота. Эти узкоспециализированные и зачастую дорогостоящие приложения имеют тенденцию к развитию и, как правило, используются в дополнение к проведению наблюдений на местности. Например, оценка риска наводнений обычно производится путем сочетания гидрогеоморфологического подхода и исторических наблюдений за наводнениями с гидрологическим анализом (зависимость между количеством осадков и стоком) и гидравлическими моделями, предназначенными для моделирования потоков [29].

Величина исходного риска, используемая для оценки риска и принятия определенных решений, соответствует периоду возврата, выбранному для защиты от того или иного явления. Он варьируется в зависимости от поставленных целей защиты, т.е. в зависимости от уровня риска, который может быть допущен коллективно. В случае наводнений обычно используется наиболее значимое событие между самым высоким историческим наводнением и столетним наводнением. Историческое наводнение может быть легче воспринято населением, если с тех пор не были приняты меры по защите от него (например, дамбы). В этом случае решение о том, учитывать или не учитывать эти меры при количественной оценке опасностей, должно приниматься по согласованию с ведомствами, отвечающими за данный проект. В соответствии с принципом предосторожности при оценке рисков принято не учитывать защитные сооружения или выделять отдельную опасную зону в случае разрушения защитного сооружения. Уровень защиты может быть повышен для решения конкретных задач [14, 29, 98].

Применительно к защите от наводнений эталонный уровень риска обычно устанавливается властями. Условно он определяется как максимальное наводнение, от которого общество решает защититься. Предполагается, что оно произойдет с ненулевой вероятностью в сроки, совместимые с определенными видами деятельности, важными для общества. Такой подход приводит к выделению зон, для которых устанавливаются специальные правила

сооружения, призванные уменьшить или сдержать негативные последствия, вызванные этой опасностью [2].

В других прикладных задачах, таких как расчет риска и разработка сценариев катастроф, в качестве исходного риска обычно выступает значительное историческое событие, последствия которого моделируются в новом социально-экономическом контексте с целью повышения осведомленности лиц, принимающих решения, и общественного мнения, а также для обоснования экономической рентабельности тех или иных мер по предотвращению катастроф [11].

#### **1.4.4. Выявление и определение приоритетных задач**

Наличие риска подразумевает наличие определенных задач, характеризующихся ценностями и определенными формами уязвимости. В качестве таких задач, определенных в данном разделе, могут выступать товары, люди, производства, виды деятельности или функции, связанные с различными системами ценностей (экономическими, социальными, стратегическими, экологическими, эмоциональными и т.д.). В рамках процесса оценки рисков эти аспекты необходимо идентифицировать, определить их местонахождение и расставить приоритеты. Как правило, они определяются на основе карт землепользования, различных баз данных (демографических, инфраструктурных, наследия, социально-экономических, экологических и т.д.) и полевых наблюдений. Рассматриваемые проблемы обычно ранжируются по степени важности и классу уязвимости [8].

Например, уязвимость городской системы города Бужумбура и пригородного района Бужумбура к наводнению в феврале 2014 г. может быть проанализирована на основе следующих основных факторов: население, медицинские учреждения, электросеть, система питьевого водоснабжения, мобильность и бизнес, а также другие объекты государственной и частной инфраструктуры. Каждый из этих факторов состоит из определенных элементов и является предметом анализа уязвимости. Например, основные

элементы электроснабжения состоят из ключевых линий и узлов сети. Они могут быть расставлены по приоритетам на основе критериев функциональной ценности, таких как передаваемое напряжение или количество обслуживаемых домов.

#### **1.4.5. Определение уязвимости**

Диагностика уязвимости является одним из важнейших этапов оценки риска, однако этот этап остается гораздо менее формализованным и стандартизированным, чем методы оценки рисков. Для характеристики различных форм уязвимости (подверженность к ущербу) обычно используются два основных подхода: социально-географический и технический [26].

##### *А. Социально-географический подход к уязвимости*

Социально-географический подход к уязвимости, чаще всего качественный, основан на анализе факторов, способствующих возникновению ущерба или неблагоприятия. Эти факторы (технические, институциональные, социально-экономические, организационные, географические, психосоциологические, культурные и т.д.) могут быть оценены с помощью различных критериев и показателей, которые варьируются в зависимости от характера уязвимых проблем и масштаба анализа. Цель такого аналитического подхода – расшифровать роль этих факторов и их взаимодействие как условий, способствующих возникновению будущей катастрофы. Уязвимость человека перед извержением вулкана в значительной степени зависит от качества восприятия риска, наличия знаний о средствах защиты и возможного поведения [86].

Известно, что эти факторы сильно различаются у разных людей в зависимости от их опыта, уровня образования и даже географического положения по отношению к той или иной причине уязвимости. Другой пример – уязвимость людей к наводнениям и засухе в Бурунди за последнее десятилетие. Можно отметить, что люди по-разному реагируют на одни и те же явления в зависимости от своего опыта и местоположения. Но реакция людей

на наводнения также зависит от их местоположения. Например, люди, живущие в районах, подвергшихся наводнениям в Бужумбуре в 2013 г. и 2014 г., более чувствительны к сильным дождям, поскольку знают, что их дома подвергнутся большему риску, чем дома людей, живущих в других районах [86].

#### *Б. Технический подход к уязвимости*

В количественном отношении технический подход к уязвимости основан на измерении потенциального ущерба как показателя уязвимости. Этот потенциальный ущерб является функцией величины опасности, ее продолжительности и чувствительности элементов, подвергающихся воздействию. Потенциальный ущерб описывается либо кривыми, либо матрицами (таблицами), которые теоретически позволяют смоделировать ущерб, например, для определенного типа сельскохозяйственного поля, подвергшегося воздействию осадков определенной величины. В зависимости от кривых показатель ущерба может соответствовать либо среднему уровню разрушения сельскохозяйственных полей данного класса (от 0 до 1), либо проценту понесенных потерь (от 0 до 100 %). Данный метод широко используется для моделирования прямых экономических потерь от землетрясений или наводнений. Перед его использованием необходимо установить классы участков эквивалентной уязвимости (т.е. провести физическую диагностику) и знать величины замещения элементов, подвергающихся воздействию [19, 86].

Он также подходит для расчета и картографирования показателей риска. С другой стороны, он используется в основном для расчета прямого ущерба, т.е. ущерба, связанного с уничтожением имущества, а в некоторых случаях и людей. В этом случае необходимо использовать кривые ущерба, которые являются функцией интенсивности повреждения инфраструктуры и положения людей (например, внутри или снаружи здания). Расчеты и большие базы данных, используемые в этих методах, как правило, опираются на применение геоинформационных систем (ГИС). Эти сценарии гибели людей и материальных потерь могут быть также уточнены путем включения в модели

пространственной и временной мобильности людей. Во всех случаях они требуют очень детального моделирования исходной опасности и некоторых критериев ее величины [19].

#### **1.4.6. Оценка риска**

В случае количественного подхода, направленного на оценку его пространственной изменчивости, риск может быть выражен с помощью показателей или индексов, включающих один или несколько критериев. Простые индексы подверженности риску могут быть построены для количественной оценки факторов риска для эталонной опасной зоны (например, количество людей в зоне наводнения), в отличие от составных (и более сложных) индексов, которые объединяют показатели опасности, факторов риска, а иногда и уязвимости.

Эти индексы могут быть пространственно распределены и агрегированы по различным пространственным и территориальным сеткам: сельскохозяйственные поля, микрорайоны, города, области, страны, геометрические сетки и т.д. Таким образом, они представляют собой способ картографирования риска. Эти индикаторы риска, как правило, разрабатываются в рамках обсерваторий (прибрежных, региональных, по наводнениям, засухам). Они облегчают сравнение и мониторинг рисков во времени, а также выявление тенденций и приоритетов для действий в зонах, подверженных наибольшему риску. Для обеспечения их долгосрочного существования и научной или оперативной ценности необходимо соблюдение двух важных условий: прослеживаемость данных, использованных для их создания (с помощью таблиц метаданных), и воспроизводимость их во времени, что позволяет регулярно обновлять их и отслеживать изменения. Есть и другие составные индексы, предназначенные для определения пороговых значений тревоги в случае стихийного бедствия [14, 94].

Некоторые индексы могут также выражать оценку потенциальных потерь (часто экономических или материальных), когда в их расчет включаются

показатели потенциального ущерба и рыночная стоимость подверженных риску активов. Индексы такого рода обычно являются результатом сценариев ущерба (или потерь), для которых целью, например, является определение экономической рентабельности защитного сооружения, предназначенного для снижения опасности или защиты объектов. Показатели ущерба рассчитываются с учетом и без учета конструкции, а полученная разница в затратах (предотвращенный ущерб) сравнивается с ценой конструкции. Как правило, они составляются в рамках анализа затрат и выгод [14, 63, 94].

#### **1.4.7. Картографирование рисков**

Картографирование рисков стихийных бедствий может применяться в нескольких пространственных масштабах, причем для каждого компонента риска и каждого этапа его оценки существуют свои особенности: информационные карты исторических явлений, карты моделируемых явлений, карты опасных явлений или факторов опасности, карты факторов уязвимости, карты ущерба или потерь, карты индексов риска, нормативные карты. Каждая из этих карт является предметом специальной экспертизы, иногда очень сложных технологических цепочек и разнообразных графических хартий, в зависимости от целей использования и целевой аудитории [60, 99].

Аналитический подход позволяет сгруппировать основные виды картографической продукции в различные семейства, охватывающие несколько различных типов картографических материалов: от карт, характеризующих опасность, до карт как средства ее предотвращения. Более практические соображения позволяют определить основные области применения этих карт: информационная, нормативная, научная (знания) и оперативная (поддержка принятия решений). Эти типологии ни в коем случае не являются окончательными, и по мере возникновения потребностей и продолжения научных экспериментов могут появляться новые типы и подтипы [60].

В Бурунди картографированием занимается Институт географии Бурунди в отделе картографии. Несмотря на то, что в стране уже существует агентство,



отвечающее за картографию, специализированная картография рисков на локальном уровне пока отсутствует. Картографирование в Бурунди в основном направлено на создание физических карт, топографических карт, карт горнодобывающей промышленности и т.д. Немногие из существующих на сегодняшний день карт уязвимости были составлены отдельными компаниями, работающими в рамках ООН, и даже эти карты недостаточно хорошо используются для управления рисками в будущем, поскольку они не обновлялись в соответствии с теми бедствиями, которые Бурунди переживает в последнее время.

В современном мире карта является одним из важнейших инструментов принятия решений во многих отраслях. Таким образом, карта стала областью знаний, а иногда и конфликтов, касающихся физических границ, которые должны применяться к риску, который по определению является виртуальным. Во многих случаях карта используется для того, чтобы материализовать риск, сделать его более осязаемым и измерить прогнозируемые последствия в виде потенциального ущерба и затрат. Картографирование становится сложной задачей, когда на карту поставлено очень многое, особенно земля и экономика. В таких случаях карта рисков становится форумом для консультаций и даже переговоров, полезных для принятия решений. Она должна быть относительно доступной для широкой общественности, сохранять память о рисках на определенный момент нашего научного знания и может быть обновлена по мере развития этого знания [1].

Однако картографирование рисков не ограничивается соображениями безопасности и права. Картографическая продукция, посвященная рискам природного происхождения, богата и разнообразна по масштабам, содержанию и целям. Она часто связана с исследовательским, объяснительным или прогностическим подходами к процессам, которые являются сложными и границы которых необходимо определить. Эти продукты предлагают широкий спектр подходов, как ручных, так и компьютерных, направленных на синтез географической информации, полезной для профилактики и устойчивого

понимания наших территорий от первых признаков опасности до пространственного моделирования потенциальных потерь [4, 60].

Развитие Интернета, ГИС и веб-картографирования позволяет более легко распространять эту географическую информацию об опасных природных явлениях с помощью интерактивных онлайн-атласов.

## **1.5. Разработка требования к геоинформационному управлению рисками**

### **1.5.1. Основные понятия географической информационной системы (ГИС)**

Существует несколько определений географической информационной системы (ГИС), но здесь стоит остановиться только на наиболее важных определениях [1, 4, 99]:

1) Определение, данное экономистом Дидье (1990): «ГИС – это набор пространственных данных, структурированных таким образом, чтобы из них можно было удобно извлекать сводки, полезные для принятия решений».

2) По мнению Федерального межведомственного координационного комитета по цифровой картографии США (1988), «ГИС – это компьютерная система, состоящая из аппаратных средств, программного обеспечения и процессов, предназначенных для сбора, управления, манипулирования, анализа, моделирования и отображения пространственно привязанных данных с целью решения сложных задач планирования и управления».

3) Согласно определению Французского общества фотограмметрии и дистанционного зондирования: «ГИС – это компьютерная система, позволяющая собирать, организовывать, управлять, анализировать, объединять, готовить и представлять географически локализованную информацию из различных источников, способствуя, в частности, управлению пространством».

4) «ГИС в узком понимании — это компьютерная система для сбора, манипулирования, хранения и визуализации цифровых пространственных данных. В более широком понимании это цифровая система для сбора,

управления, анализа, моделирования и визуализации пространственных данных для целей планирования, управления и контроля природной среды, а также для социально-экономических приложений» [99].

### **1.5.2. Исторические сведения о ГИС**

Впервые ГИС появились в 1960-х г. в Канаде и США. Исследователи Канадской географической информационной системы (1964 г.) первыми применили ГИС для сбора данных о землепользовании и окружающей среде для значительной части Канады. Два других института в США, Нью-Йоркская информационная система землепользования (1967 г.) и Миннесотская информационная система (1969 г.), также использовали ГИС в этом десятилетии. С тех пор затраты и технические трудности значительно сократились [4].

### **1.5.3. Географическая информация (ГИ)**

Географическая информация – это данные с пространственной привязкой, представленные в виде географических координат, названия места, почтового адреса или иного адреса. Ее можно дублировать без ухудшения качества, обмениваться с высокой скоростью по сетям и комбинировать с другими данными для получения новой информации [4, 54].

Географическая информация собирается, хранится, анализируется, отображается и распространяется с помощью геоинформационных систем (ГИС). Это информация, связанная с объектом или явлением и описанная более или менее полно:

1. по различным характеристикам (т.е. по характеру и внешнему виду);
2. по своему местоположению на Земле.

Первая группа данных также называется атрибутами, а вторая – геометрическими данными. Например, географическая информация (ГИ) о дороге определяется количеством полос, ее поверхностью, названием,

размерами и положением на земной поверхности. Следует отметить, что ГИ все чаще присутствует в нашей жизни в цифровой форме [54, 60].

#### **1.5.4. Основные компоненты геоинформационной системы**

Географическая информационная система включает:

– *компьютерное оборудование*

ГИС работает на очень широком спектре компьютеров (сетевые офисные ПК или автономные компьютеры).

– *программное обеспечение*

Программное обеспечение ГИС предоставляет инструменты, необходимые для сохранения, изучения и визуализации географической информации.

– *данные (географическая информация)*

Данные являются ключевым компонентом ГИС. Географическая информация, может быть, либо собрана собственными средствами, либо получена от производителей данных [54].

– *подготовленный персонал*

ГИС – это прежде всего инструмент, поэтому его использование зависит от пользователя – «эксперта ГИС». Следует отметить, что ГИС разрабатываются таким образом, чтобы ими могли манипулировать несколько типов пользователей – от тех, кто создает и поддерживает системы, до пользователей программного обеспечения для обработки географической информации. В настоящее время, благодаря доступности ГИС в Интернете, число пользователей ГИС значительно увеличивается.

#### **1.5.5. Основные функции ГИС**

ГИС создаются для удовлетворения различных потребностей и, поскольку единой системы не существует, их приходится корректировать в зависимости от поставленных задач. Тем не менее, следует сказать, что

существует 5 основных функций, которые должны обеспечивать все ГИС [51, 60]:

- разработка модели, которая упорядочивает данные по геометрическим составляющим и описательным атрибутам, а также позволяет устанавливать связи между объектами;
- программное обеспечение должно иметь функции оцифровки и импорта данных;
- программное обеспечение должно иметь большой объем памяти для хранения данных;
- умение анализировать географические данные (количественные и статистические методы, топологические операторы и т.д.);
- возможность отображения географической информации в виде карт, таблиц, графиков и т.д.

#### **1.5.6. Области применения геоинформационных систем**

Области применения геоинформационных систем подразделяются:

##### *1. для крупных масштабов*

- управление земельными и кадастровыми ресурсами (например, инвентаризация частных участков и расчет их площадей);
- градостроительство (например, составление карт землепользования и планов развития городов);
- управление природными или городскими зелеными насаждениями (например, природными парками и скверами).

##### *2. для средних и малых масштабов*

- определение наилучших мест для размещения нового ресурса или так называемая карта пригодности;
- инженерно-дорожные изыскания (например, строительство дорог или автомагистралей);
- применение для предотвращения рисков стихийных бедствий [41].

### **1.5.7. Свойства геоинформационных систем**

Идеальная ГИС обладает определенными качествами, которые перечислены ниже:

- доходность (в зависимости от разрешения организации);
- актуальность (особенно для результатов);
- гибкость (способность к развитию);
- безопасность (обеспечение защиты конфиденциальной информации).
- конкурс (проверка качества и эффективности обработки);
- автономность (в частности, программы, обеспечивающей эволюцию переносимости);
- кооперативность (должны быть четко определены задачи и функции различных подразделений и вовлеченных в процесс лиц);
- мотивация (разработка и использование должны управляться пользователем);
- документация (должна быть написана совместно с разработкой программного обеспечения) [41, 51].

### **1.5.8. Типы данных в ГИС**

Все пространственные геометрии могут быть описаны 4 типами свойств:

- расположением на земной поверхности;
- пространственными отношениями (топологией);
- атрибутами;
- метаданными.

Пространственные данные определяют пространственные характеристики географического объекта, в котором представлены и распознаны все графические объекты:

- местоположение – это координаты объекта относительно системы отсчета (референтного меридиана);

- форма (возможно, точка, линия или полигон);
- размер (длина, периметр, площадь поверхности).

В ГИС существует 2 способа проецирования географических данных:

### *1. Векторный режим*

Векторные данные – это набор пространственных объектов, каждый из которых представлен точкой, линией и полигоном.

Примеры векторных данных:

- поверхностные данные, такие как земельный участок или любое другое тематическое зонирование, представляются в виде полигонов;
- линейные данные, такие как технические сети, водотоки или дороги, представляются линиями;
- точечные данные, такие как скважины, точки зондирования и штабы ферм, представляются точками [41, 51, 61].

### *2. Растровые данные*

Числовое значение, присвоенное каждой ячейке, соответствует значению атрибута. Демаркация происходит на границах множеств ячеек с одинаковым значением, и они необязательно совпадают с границами объектов на местности. [41, 51, 61].

## **1.5.9. Метод получения географической информации**

Получение пространственных данных предполагает объединение различных источников для сбора данных с целью их интеграции в ГИС. В данном разделе описаны различные методы получения пространственных данных [34, 61].

### *А) Импортирование файлов*

В основном существует три способа импорта пространственных данных:

1. Импорт базы данных, организованной в формате ГИС-интерфейса. Этот способ подходит для ГИС одного типа, но сложен для ГИС разных типов или версий.

2. Импорт текстового файла (txt), содержащего всю примитивно структурированную информацию. Следует отметить, что при использовании этого метода импортируемые данные должны быть упорядочены в соответствии с внутренней структурой ГИС.

3. Использование одного из имеющихся на рынке стандартов обмена. Этот вариант является наиболее экономичным в долгосрочной перспективе [34, 10, 41, 61].

#### *Б) Топографические съемки*

Топографическая съемка выполняется с помощью теодолитов. Теодолит — это геодезический прибор, оснащенный оптическим устройством, которое вычисляет углы в горизонтальной и вертикальной плоскостях для определения направления. Он используется для триангуляционных измерений. Этот прибор позволяет определить линию от соседа к соседу по отношению к исходному пункту [10, 70].

#### *В) Аэрофотоснимки*

Совокупность объединенных снимков дает полную картину местности. Полученные фотоизображения позволяют определить координаты и высоту расположения точек [10, 70].

#### *Г) Спутниковые*

Со спутников наблюдения Земли данные передаются в виде цифровых изображений в растровом режиме. Перед интеграцией в ГИС эти данные должны пройти ряд этапов обработки [32, 70].

#### *Д) Глобальная система позиционирования (GPS)*

Система GPS использует спутники для расчета местоположения (координаты с точностью до нескольких сантиметров или даже нескольких миллиметров) [10, 32, 34, 70].

#### *Ж) Информатизация*

Перевод в цифровую форму подходит для векторного представления. Эта техника обеспечивает сохранение информации, представленной в базовом



документе. При слишком большой нагрузке на базовые документы может потребоваться их предварительная обработка [10, 32, 34, 70].

### *3) Сканирование чертежей*

Идеально подходит для растрового представления. Этот метод ввода является быстрым и недорогим. Если данные отсканированы и имеют географическую привязку, то это "растровые" данные. Единственная проблема этого метода – ошибки перезаписи, связанные с исходным носителем [10, 32, 34, 70].

#### **1.5.10. Понятие базы географических данных**

ГИС хранят пространственные и атрибутивные данные в виде географической базы данных, которая состоит из ряда слоев географической информации, организованных эффективным образом для использования одним или несколькими приложениями. Следует отметить, что данные должны быть «накладываемыми», т.е. находиться в одной системе координат или в совместимых системах, позволяющих передавать данные из одной системы в другую («географическое преобразование») [36].

#### **1.6. Требования к управлению гидрометеорологическими рисками с использованием геоинформационных систем в сельскохозяйственном секторе Бурунди**

Как уже отмечалось выше, Бурунди испытывает ряд климатических катастроф. Учитывая, что большинство опасных климатических явлений происходит неожиданно, несмотря на существующее в Бурунди прогнозирование погоды, значительная часть населения не обладает достаточными навыками для понимания последствий метеорологических явлений. Кроме того, в Бурунди пока не существует узкоспециализированного механизма управления стихийными бедствиями, связанными с сельскохозяйственной деятельностью. Рельеф Бурунди очень гористый,

поэтому водные объекты легко затапливаются, на склонах происходит эрозия, а страна очень чувствительна к высоким температурам [102, 107].

Для борьбы с рисками, сдерживающими сельскохозяйственный сектор, большую роль может сыграть внедрение геоинформационной системы (ГИС), особенно в плане облегчения понимания районов, наиболее подверженных климатическим рискам. Внедрение в геоинформационную систему математического моделирования для прогнозирования рисков поможет снизить риски, препятствующие развитию сельскохозяйственного сектора, что, в свою очередь, будет способствовать экономическому развитию страны [29, 43].

Для корректной работы управления рисками геоинформационная система должна выполнять следующие рекомендации:

1. *Планирование.* Программы обеспечения безопасности начинаются с понимания проблемы. Это предполагает стратегическое и тактическое планирование для определения местоположения и выявления потенциальных проблем управления рисками. С помощью геоинформационных систем можно определить эти риски и оценить их последствия. В плане должны быть выявлены очевидные опасности, такие как наводнения, эрозия, засуха, а также другие потенциальные риски или цели. Данные о рисках могут быть объединены с другими картографическими данными (плотность населения, улицы, трубопроводы, линии электропередач, рельеф, состояние грунта) для получения рациональной оценки рисков [29, 43].

2. *Меры по устранению последствий.* После проведения оценки риска с помощью ГИС-анализа можно легко определить наличие вблизи установленной опасной зоны строений, инженерных коммуникаций, сельскохозяйственных полей, скотомогильников и пострадавших населенных пунктов. Эти данные могут быть использованы для определения потенциального влияния рисков. Другие меры по снижению рисков могут быть направлены на контроль рисков превышения критического уровня и создание буферных зон безопасности вокруг сооружений, подверженных высокому риску, или на экологический мониторинг. Снижение риска предполагает

понимание потенциальных опасностей, которые могут возникнуть в результате этих чрезвычайных ситуаций, и их целенаправленное использование для защиты и/или предотвращения [29, 43].

3. *Готовность.* Готовность включает в себя деятельность по подготовке к реальным чрезвычайным ситуациям. Эти мероприятия предусматривают планирование действий в чрезвычайных ситуациях, создание моделей и обучение. При возникновении чрезвычайной ситуации ГИС может быть использована для ответа на такие вопросы, как: «Где должны быть размещены группы быстрого реагирования для улучшения времени и возможностей реагирования?» или «Какие критически важные активы были потеряны?» [29, 43].

4. *Реагирование.* Первоочередной задачей при ликвидации последствий стихийного бедствия является обеспечение безопасности людей и ликвидация угрожающих жизни ситуаций, таких как пожар, взрывы, наводнения, обрыв проводов или обрушение конструкций. Специалисты по управлению рисками должны стабилизировать ситуацию и снизить вероятность вторичного ущерба, а также ускорить проведение других экстренных операций для восстановления работоспособности пострадавших [29, 43].

5. *Восстановление.* Восстановительные работы начинаются после того, как непосредственная угроза жизни, имуществу и критической инфраструктуре устранена. Восстановительные работы часто проходят в два этапа – краткосрочный и долгосрочный. Как следствие, географические информационные системы (ГИС) могут применяться в сельском хозяйстве, на всех уровнях государственного управления для управления рисками, на всех этапах подготовки, планирования, реагирования, восстановления и снижения последствий чрезвычайных ситуаций. Географические информационные системы стали наиболее значимым базовым инструментом для картографирования и моделирования в условиях чрезвычайных ситуаций [29, 43].

Краткосрочные восстановительные работы могут быть визуально отображены и быстро обновлены. Визуальная карта состояния может быть доступна и просмотрена дистанционно лицами, принимающими важные решения. Это особенно полезно при крупных чрезвычайных ситуациях или катастрофах, когда в разных местах проводится множество мероприятий. ГИС очень важна для понимания масштабов, сложности и серьезности чрезвычайной ситуации. Кроме того, портативные компьютеры и портативные электронные устройства позволяют обновлять основную базу данных [29, 43].

Долгосрочное восстановление означает восстановление всех услуг до нормального или лучшего уровня. В данный период ГИС можно использовать для идентификации объектов, оценки ущерба и определения приоритетности основных проектов восстановления. По мере выделения средств на восстановление можно регистрировать учетную информацию и привязывать ее к каждому объекту [29, 43].

## Выводы по главе 1

Экономика Республики Бурунди в значительной степени основана на сельскохозяйственной деятельности. Как уже отмечалось в данной главе, этот сектор подвержен сильному давлению опасных климатических явлений, которые требуют особого управления для снижения рисков и повышения экономического уровня страны. Географическая структура Бурунди также очень сложна, что усиливает последствия опасных климатических явлений на значительной части территории страны.

Несмотря на то, что западный регион Бурунди (равнина Имбо) получает меньше осадков, чем другие регионы, он гораздо больше подвержен наводнениям, чем остальная часть страны в целом. Это объясняется двумя факторами. Во-первых, этот регион расположен очень близко к озеру Танганьика, и уровень грунтовых вод находится практически на одном уровне с земной поверхностью, что может усиливать периодические наводнения в этом регионе. Кроме того, регион находится непосредственно под склонами гор, образующих склоны хребта Конго – Нил, а это значит, что дождевая вода легко стекает на равнину Имбо. К тому же в районе хребта Конго – Нил выпадает больше осадков, чем на остальной территории Бурунди, поэтому такие дожди могут легко вызвать наводнение на равнине Имбо.

Сельскохозяйственная деятельность также сопровождается рядом рисков на территории плоскогорий, образующих хребет Конго – Нил. В основном эти риски связаны с эрозией. Это обусловлено, во-первых, большим количеством осадков в данном регионе, а во-вторых, тем, что для этого региона, имеющего крутые склоны, эрозия является нормальным явлением.

На центральных плато выпадает умеренное количество осадков, а крутые склоны отсутствуют по сравнению с остальной частью страны, хотя есть несколько небольших гор. По этой причине данный регион в меньшей степени, чем другие, подвержен риску наводнений и эрозии. С другой стороны, в

регионе есть районы, особенно подверженные засухе, в частности, провинция Карузи.

Впадина Кумосо получает более умеренное количество осадков, чем другие регионы. Этот регион не подвержен большому риску эрозии благодаря наличию незначительных горных склонов, отделяющих его от центрального плато.

В северо-восточной части выпадает нормальное годовое количество осадков, однако регион часто страдает от сильной засухи. Эта засуха является причиной низких урожаев сельскохозяйственных культур, поэтому этот регион остается наиболее часто подверженным голоду.

Как уже отмечалось выше, одной из приоритетных задач Бурунди является управление рисками, связанными с климатическими условиями, однако на сегодняшний день Бурунди не обладает высококвалифицированным персоналом для управления этими рисками, поэтому существует необходимость в образовании специализированной структуры, способной создать механизм предупреждения населения о потенциальных рисках. Также необходимо разработать модель географической информационной системы, способной управлять рисками, затрудняющими экономическое развитие страны, особенно в сельскохозяйственном секторе. Такая модель позволит руководителям принимать меры по снижению последствий тех или иных метеорологических явлений, а службам экстренного реагирования – определять наиболее уязвимые районы с целью спасения людей в случае стихийных бедствий. Внедрение модели прогнозирования рисков и их последствий в геоинформационную систему управления рисками в сельском хозяйстве позволит лицам, принимающим решения, давать указания фермерам по правильному ведению сельскохозяйственной деятельности, а также по снижению потерь.

## **Глава 2. Модель оценки рисков**

### **2.1. Параметрическая модель оценки гидрометеорологических рисков в сельскохозяйственном секторе республики Бурунди**

В последние годы в большинстве стран, особенно в Республике Бурунди, отмечается тенденция к росту числа случаев стихийных бедствий. В результате сильно страдает сельскохозяйственный сектор, что заставляет использовать технические методы оценки риска и надежности для более глубокого и достоверного анализа рисков потерь, связанных с катастрофическими событиями. Эти методы направлены на получение более надежных описаний вероятных потерь на основе статистического анализа исторических данных. Огромные потери, понесенные в результате недавних природных явлений, привели к необходимости поиска методов, позволяющих добиться большей точности. Несмотря на наличие данных гидрометеорологического прогнозирования, Бурунди сильно пострадала из-за того, что прогнозы часто оказываются неточными, а многие люди не обращают на них особого внимания из-за отсутствия уверенности [30, 81].

Для того, чтобы обеспечить надежное управление рисками, угрожающими сельскохозяйственной деятельности, необходимо создать параметрическую модель, учитывающую фактические данные, собранные за последние несколько десятилетий, для моделирования вероятности возникновения климатических явлений, которые могут нанести ущерб определенным видам экономической деятельности [30, 81].

Для управления рисками параметрическая модель анализирует исторические данные и, используя статистические характеристики этих данных, определяет основные показатели риска на определенный период в будущем. Другими словами, данная модель заключается в прогнозировании характеристик возникновения явления  $x$ , способного вызвать негативные

последствия или замедлить ход определенных видов деятельности за выбранный период времени.

Для того, чтобы рассматривать возможности прогнозирования рисков, необходимо определить значение понятия «прогноз».

Прогнозирование – разработка прогноза; в узком значении – специальное научное исследование конкретных перспектив дальнейшего развития какого-либо процесса [74].

Исходя из ряда источников [43, 107], под прогнозом гидрометеорологической обстановки понимается некая составляющая параметров (оценок) будущего состояния системы (атмосфера, водная среда и другое), полученных в результате аналитической обработки.

Прогноз – предзнание (М.В. Ломоносов), предсказание, предвидение, основанное на научных наблюдениях, на жизненном опыте или на оценке вероятности событий, или получение математических выводов о будущем состоянии или изменениях на основе анализа условий в настоящем и прошлом, а также результат процесса прогнозирования, выраженный в словесной, математической, графической или другой форме.

Параметрическое моделирование – это принцип моделирования, при котором используются параметрические данные отдельных элементов объекта и соотношения между ними [74].

При параметрическом моделировании оценки риска учитываются исторические значения заданных параметров. Используя статистические данные, модель способна определить показатели, определяющие поведение того или иного явления.

В данном исследовании параметрическое моделирование обусловлено определением показателей, непосредственно связанных с параметрами, определяющими опасные климатические явления, которые влияют на сельскохозяйственную деятельность и другие виды деятельности, приносящие доход стране. Бурунди часто страдает от наводнений, вызванных ливневыми дождями, но также подвержена эрозии, которая затрагивает значительную



часть территории страны. Кроме того, центральная часть страны и северо-восточная впадина часто страдают от засухи. Эти вышеупомянутые климатические опасности определяются количеством осадков и температурой воздуха в регионе, поэтому при параметрическом моделировании необходимо учитывать общее поведение этих факторов для получения показателей, которые позволят в будущем правильно управлять и понимать их влияние [52].

Уровень ущерба, вызванного изменением температурного режима и режима выпадения осадков не является постоянным, а изменяется по стохастическим законам. Все параметры, условия функционирования и характеристики состояния прогнозируемого объекта представлены случайными величинами и связаны стохастическими (т.е. случайными, нерегулярными) зависимостями, поэтому характеристики состояния в модели определяются не однозначно, а по законам их вероятностного распределения [52, 74].

Рост и развитие растений могут происходить при определенных условиях (заданная температура, заданное количество осадков, заданное количество света, заданное количество кислорода и т.д.). В то же время рост и развитие растений могут быть повреждены при выходе за пределы условий, необходимых для роста. С помощью математической модели управления рисками можно определить вероятность выхода за определенный уровень параметра, после которого для определенного растения может наблюдаться повреждение [29, 52, 98].

Согласно методам управления рисками, представленным российским ученым Е.П. Истоминым, изложенным в работе [29], при прогнозировании риска от какого-либо события, необходимо спрогнозировать вероятность наступления такого события  $Q(t_3)$ , где  $t_3$  – глубина прогноза.

Событие (например, засуха, наводнения, эрозия и т.д) считается наступившим, если уровень значения температуры или осадка ( $X(t)$ ) превысил определенные границы, т.е. событие не началось, если уровень заданного параметра находится в пределах  $D(t)=[a(t),b(t)]$ , где  $a(t)=0, b(t)$  – ординатор [57].

Предположим, что закон изменения во времени температуры воздуха и осадков хорошо описывается гауссовским процессом с параметрами  $m_x(t)$ ,  $\sigma_x(t)$  и  $r_x(t_1, t_2)$ . [15, 29, 52].

Будем считать, что событие имеет двухсторонний предел  $D(t) = [a(t), b(t)]$ , где  $a(t)$  и  $b(t)$  могут иметь любые значения в зависимости от условий, необходимых для развития конкретного растения.

$a(t)$  – нормальное значение параметра (температуры, осадков), начиная с которого растения хорошо растут.

$b(t)$  – уровень параметра (температуры, осадков), при котором урожай начинает повреждаться.

Для оценки рисков используем выражение:

$$P^*(t_3 / x_0) = \Phi\left\{\frac{b - m_x(t_3) - r_x(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x(0)]}{\sigma_x(t_3) \sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}}\right\} - \Phi\left\{\frac{-m_x(t_3) - r_x(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x(0)]}{\sigma_x(t_3) \sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}}\right\} \quad (2.1),$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\{-z^2/2\} dz \quad (2.2).$$

$P^*(t_3 / x_0)$  – это вероятность того, что случайный процесс не выходит из заданных пределов при условии, что известно значение этого процесса в начальный момент времени  $t = 0, (x(t = 0) = x_0)$  [20, 29, 52].

Пусть  $R^*(t_3 / x_0)$  – это вероятность того, что случайный процесс выходит из заданных пределов при условии, что известно значение этого процесса в начальный момент времени  $t = 0, (x(t = 0) = x_0)$ .

Тогда можно найти значения по формуле:

$$R^*(t_3 / x_0) = 1 - P^*(t_3 / x_0) \quad (2.3).$$

Считается, что на величину ущерба от заданного параметра (температуры, осадков) оказывает влияние ряд факторов: максимальный уровень заданного параметра (выше ординара), скорость нарастания заданного параметра, длительность события, вызванного заданным параметром. С учетом этого сделаем некоторые предположения [20, 52].

Ущерб, нанесенный событием, пропорционален площади фигуры, ограниченной кривой  $X(t)$  и уровнем  $C$  (рис. 2.1.).

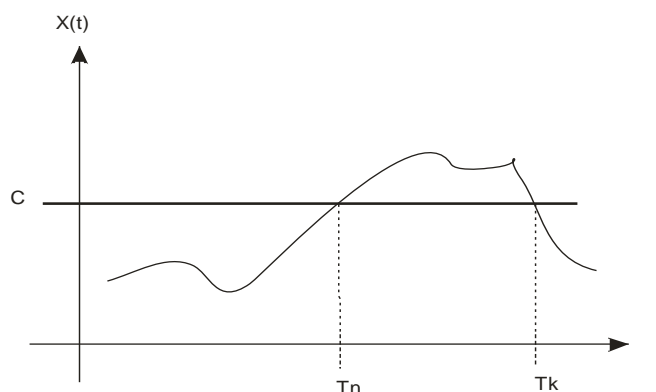


Рис. 2.1. Начало и окончание события, приводящего к риску [7, 29, 83].

Обозначим:

$$I = \int_{T_n}^{T_k} (X(t) - c) dt \quad (2.4),$$

где  $I$  – показатель ущерба;

$T_n$  – начало события;

$T_k$  – окончание события;

$I_{\max}$  – максимальный показатель ущерба.

Тогда:

$$k_u = \frac{I}{I_{\max}} \quad (2.5),$$

где  $k_u$  – коэффициент ущерба.

Поскольку в выражении (2.4) все величины являются стохастическими, получить аналитическое выражение для уравнения (2.5) в задачах прогнозирования практически невозможно. Воспользуемся оценкой для  $I$  и соответственно  $k_u$  [3, 52].

Предположим, что нам известны прогнозируемые оценки  $X_m$  максимально возможного значения температур или количества осадков  $X_{\max}(t)$  и времени нахождения случайного процесса  $X(t)$  выше уровня  $C$ , которое может быть получено из соотношения:

$$\theta = k_k - k_n \quad (2.6),$$

где  $\theta$  – продолжительность прогнозируемого периода наводнения или засухи является случайной величиной, но может иметь оценку в виде ее математического ожидания  $\bar{T}$ .

Тогда (рис. 2.2.) в качестве оценки  $\bar{I}$  интеграла (2.4) для численного интегрирования может быть использована формула треугольника:

$$\bar{I} = \frac{1}{2} \cdot \bar{T} \cdot \bar{X}_m \quad (2.7),$$

где  $\bar{X}_m = X_m - C$

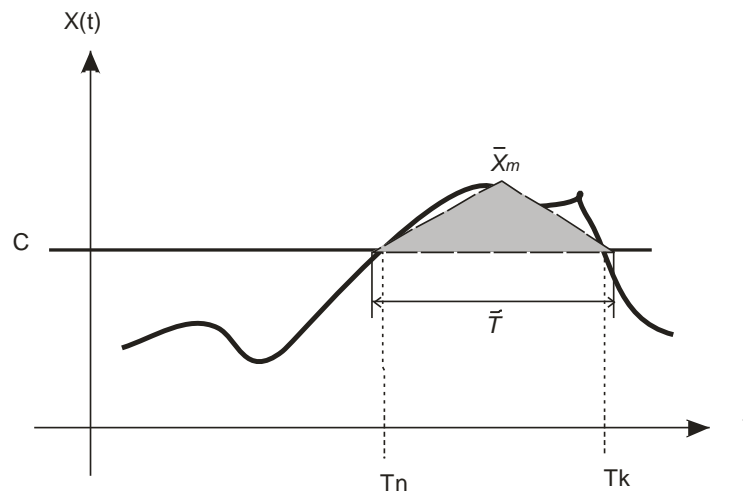


Рис. 2.2. Оценка интеграла  $\bar{I}$ .

Для оценки  $I_{\max}$  воспользуемся следующими допущениями. Прежде всего, из истории наблюдения температур или количества осадков возможно определить наблюдаемый максимум значений  $X_{\max}$  и наблюдаемую максимальную продолжительность количество осадков или температур  $T_{mm}$ . Тогда в качестве оценки  $I_{\max}$  можно воспользоваться той же формулой треугольников:

$$I_{\max} = \frac{1}{2} \cdot T_{mm} \cdot X_{mm} \quad (2.8),$$

где  $X_{mm} = X_{\max} - C$ .

Подставим (3.8) и (3.7) в (3.6) получим оценку коэффициента ущерба:

$$k_u = \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{mm} \cdot X_{mm}} \quad (2.9).$$

Коэффициент ущерба может принимать значения от 0 до 1.

Для оценок времени прогнозируемого события (наводнения или засухи)  $\bar{T}$  и возможного максимума параметра (температуры или количества осадков)  $X_m$  можно использовать различные методы, как физические модели, так и стохастические методы. Выбор метода зависит от поставленных задач исследования и глубины прогноза.

Для оценки риска необходимо определить ущерб, который будет нанесен при наступлении события (например, наводнения или засухи), вызвавшего риск [3, 52].

Представим, что ожидаемый ущерб от события (наводнения или засухи) можно определить по максимальному ущербу, наблюдавшемуся ранее. Тогда на величину ожидаемого ущерба будет влиять показатель ущерба  $I$ , значение которого можно рассчитать по формуле (2.4). Однако получить точное значение  $I$ , как и точное значение прогнозируемого ущерба, невозможно, поэтому будут использоваться оценки этих показателей [15, 25, 52, 55].

Пусть величину ущерба можно оценить, как:

$$\bar{W} = k_u \cdot W_{\max}, \quad (2.10),$$

где  $k_u$  – коэффициент ущерба;

$\bar{W}$  – оценка прогнозируемого ущерба;

$\bar{W}_{\max}$  – максимальный наблюдаемый ущерб.

Тогда, используя оценку для  $k_u$  из (3.9), получим следующее выражение:

$$\bar{W} = \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{mm} \cdot X_{mm}} \cdot W_{\max}. \quad (2.11).$$

В результате некоторых преобразований получена оценка предполагаемого ущерба в случае наступления события (наводнения, засухи или другого события), приведшего к нему.

Для оценки риска воспользуемся результатами, полученными в работе [111], где

$$\bar{R}^* = (1 - P_*(t_3/x_0)) \cdot \bar{W} \quad \text{— верхняя оценка риска} \quad (2.12),$$

а  $P(t_3/x_0)$  — вероятность невыхода случайного процесса за пределы установленных границ при условии, что нам известно значение этого процесса в начальный момент времени:  $t=0$  ( $x(t=0) = x_0$ ) [55, 77].

Тогда

$$\bar{R}^* = (1 - P_*(t_3/x_0)) \cdot \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{mm} \cdot X_{mm}} \cdot W_{\max} \quad (2.13).$$

Предположим, что на этапе предварительных наблюдений был установлен закон изменения во времени заданного параметра, который хорошо описывается гауссовским процессом с параметрами  $m_x(t)$ ,  $\sigma_x(t)$  и  $r_x(t_1, t_2)$ .

Будем полагать, что событие обладает двусторонним пределом  $D(t) = [a(t), b(t)]$ ,  $a(t) = -\infty$ ,  $b(t) = b$  (нижняя граница устанавливается тождественно  $-\infty$ , чтобы исключить влияние нормального уровня, с которого растения хорошо растут).

Тогда, после преобразований (2.13), получается:

$$\bar{R}^* = 1 - \left( 1 - 1 / \sqrt{2\pi(1 - r^2(0, t_3))} \int_0^{t_3} \omega(t/x_0) dt \right) \cdot \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{mm} \cdot X_{mm}} \cdot W_{\max} \quad (2.14),$$

где  $\omega(t/x_0) = P\{X(t) \in D(t), X(t+\tau) \in D(t+\tau) / X(0) = x_0\}$

$$\Phi(x) = 1 / \sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^x \exp\{-z^2/2\} dz. \quad (2.15).$$

## **2.2. Разработка параметрической модели управления гидрометеорологическими рисками**

Для реализации этой модели на практике использован Visual Basic for Applications (VBA). Этот язык программирования позволил создать скрипт, который может автоматически рассчитать все характеристики, составляющие функцию, позволяющую спрогнозировать вероятность наступления риска. С помощью этого языка была создана модель, которая удобна в использовании и позволяет пользователю легко манипулировать ею в зависимости от требований к уровню параметров, при которых можно ожидать ущерб. Данная модель масштабируется в различных диапазонах, что позволяет пользователю прогнозировать гидрометеорологические риски на разных уровнях по необходимости [12, 46, 79].

Эта модель может быть запущена через Microsoft Excel. Через диалоговые окна модель просит пользователя вручную указать диапазон, в котором значения данного параметра не приводят к возникновению ущерба. Затем модель автоматически рассчитывает прогноз вероятности выхода за пределы, вероятности невыхода за пределы, коэффициента ущерба в зависимости от уровня параметра и автоматически строит графику ряда параметров, включая уровни, при которых был сделан прогноз для облегчения визуальной интерпретации полученных результатов.

Поскольку при отсутствии достаточного количества осадков повышение температуры оказывает негативное влияние на рост и развитие некоторых растений, в данном исследовании была сделан прогноз рисков, вызванных повышением температуры. Кроме того, известно, что большое количество осадков может вызвать наводнение или эрозию, поэтому данная модель также использовалась для проведения исследований по управлению рисками, вызванными чрезмерным количеством осадков.

В качестве примера была спрогнозирована вероятность того, что температура превысит 25 °С, затем 27 °С, затем 29 °С и, наконец, 31 °С. В качестве нормального уровня температуры была взята температура 15 °С, так

как при этой температуре почти все растения растут нормально. Прогноз рисков для сельскохозяйственной деятельности касался июля месяца, когда в Бурунди обычно не выпадает достаточного количества осадков. Этот недостаток осадков может быть усугублен повышением температуры в регионе. Для проведения этого исследования модель использует основные температурные характеристики, наблюдаемые в течение месяцев июня и июля, что позволило спрогнозировать возникновение рисков для месяца августа [49, 73, 82].

После запуска этой модели были получены следующие результаты:

Bi	P(Tz/Xo)	R(Tz/Xo)	Dr	Ku
25	0.00588111	0.99411889		0.492601
27	0.512638653	0.487361347	0.506757543	0.291207
29	0.995096631	0.004903369	0.989215521	#DIV/0!
31	0.999999858	1.42236E-07	0.994118748	#DIV/0!

Рис 2.3. Пример полученных результатов при применении модели для данных температур, полученных со станции Гитега.

Расшифровка представленных на рис. 2.3 результатов:

$B_i$  – представляет собой уровень температуры, выше которого температура может нанести ущерб сельскохозяйственной деятельности. Для данного исследования были выбраны четыре различных температурных уровня.

$P(Tz/Xo)$  – эквивалентно  $P^*(t_3 / x_0)$  и представляет собой вероятность того, что температура не выходит из заданных пределов заданного уровня « $B_i$ ».

$R(Tz/Xo)$  – эквивалентно  $R^*(t_3 / x_0)$  и представляет собой вероятность того, что температура выходит из заданных пределов заданного уровня « $B_i$ ».

$Dr$  – представляет собой разницу между наблюдаемым риском на уровне « $B_i$ » по сравнению с наблюдаемым риском на начальном уровне.

$Ku$  – представляет собой коэффициент ущерба в зависимости заданного уровня « $B_i$ ».



Как показано на рис. 2.3, чем ниже уровень температуры « $V_i$ », тем выше вероятность того, что он будет сопровождаться большим риском, и, соответственно, коэффициент ущерба  $K_u$  увеличится. Если уровень температуры « $V_i$ » повышается, вероятность того, что он будет иметь большой риск, уменьшается и, соответственно, уменьшается коэффициент ущерба. В данном случае для температурного уровня выше 29 °С риск равен нулю, и поэтому модель показывает, что коэффициент ущерба  $K_u$  – не существует и модель вместо значения показывает (#DIV/0!). Если при температурном уровне « $V_i$ » ущерб отсутствует, рекомендуется сажать наиболее устойчивые растения при температуре ниже этого уровня [73, 82].

Кроме того, модель отображает результаты в графическом виде, чтобы облегчить пользователю быструю расшифровку результатов.

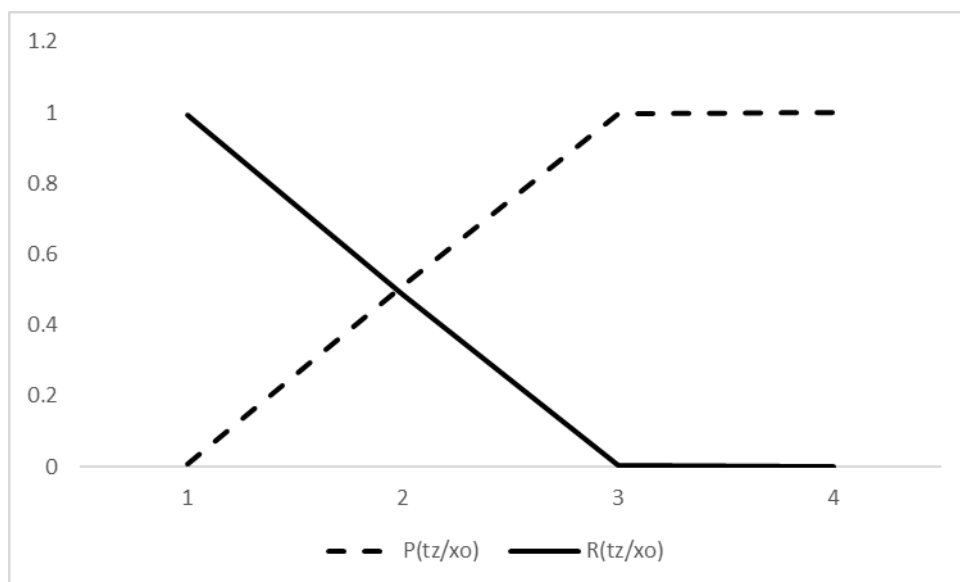


Рис 2.4. Пример полученных результатов в виде графика при применении модели для данных температур, полученных со станции Гитега.

Как показывают результаты на рис. 2.4, по мере уменьшения температурного уровня « $V_i$ » вероятность того, что температура не превысит этот уровень, уменьшается, а вероятность того, что температура превысит этот уровень, увеличивается. Наоборот, по мере увеличения уровня температуры « $V_i$ » вероятность того, что температура не превысит этот уровень,

увеличивается, а вероятность того, что температура превысит этот уровень, уменьшается.

Аналогичным образом эта модель была применена к данным о температуре и осадках, полученным с различных метеостанций. Результаты показывают, что модель гораздо более необходима для управления рисками различных характеристик. Тем не менее, она оказывается сложной для одновременной интерпретации пространственных данных. Сложность заключается в том, что она позволяет рассчитывать риски, вызванные любым событием, отдельно для конкретной точки, что усложняет пространственную интерпретацию зон риска [16, 78].

Для облегчения пространственной интерпретации или пространственного анализа результатов, полученных с помощью этой модели, необходимо внедрить геоинформационную модель, которая может быть применена для прогнозирования рисков с помощью процессов, используемых в этой параметрической модели [16, 78, 100].

## **Выводы по главе 2**

Во второй главе показаны принципы работы модели управления гидрометеорологическими рисками, для практической реализации которой была разработана модель на языке VBA. Результаты, получаемые с помощью этой модели, включают коэффициент риска и коэффициент ущерба. Эти параметры важны для принятия решений, поскольку, опираясь на них, можно принимать рациональные решения о мерах, которые можно предпринять для минимизации негативного влияния природных явлений, способных затормозить сельскохозяйственную деятельность в различных регионах Республики Бурунди.

Следует также отметить, что преимущество данной модели заключается в том, что она может использоваться для управления рисками, вызванными не только осадками и температурой, но и другими факторами, способными нанести ущерб сельскохозяйственному сектору. Поскольку сама модель анализирует всю информацию, касающуюся поведения любого явления в предыдущие периоды, и благодаря его статистическим характеристикам она способна сделать прогноз развития рисков, которые могут быть вызваны подобным явлением.

Таким образом, чтобы обеспечить пространственную интерпретацию результатов прогнозирования показателей риска, необходимо внедрить эту модель в качестве независимого модуля в существующую географическую информационную систему, чтобы пользователь этой модели мог легко проанализировать пространственную вариацию показателя. Пространственное распределение показателя риска, в свою очередь, позволит лицам, принимающим решения, разграничить зоны повышенного риска и принять соответствующие меры в зависимости от потерь, которых они хотят избежать.

## **Глава 3. Методика управления гидрометеорологическими рисками**

### **3.1. Анализ спутниковых данных**

Учитывая, что Республику Бурунди часто сотрясают наводнения и эрозия, крайне необходимо проанализировать все особенности ее рельефа, чтобы в полной мере понять их влияние на возникновение рисков, угрожающих аграрному сектору страны [5].

Форма, площадь, тип почвы и рельеф водосборной площади также влияют на количество воды, попадающей в реку. Эти факторы обычно постоянны. Однако степень поглощения или рассеивания воды почвой зависит от растительного покрова, времени года и количества прошедших осадков [5].

Для анализа основных физических характеристик Бурунди использовались спутниковые данные, полученные через сайт «EarthExplorer». Анализ проводился с использованием геоинформационной системы для получения основных характеристик, необходимых для определения состояния рельефа Бурунди.

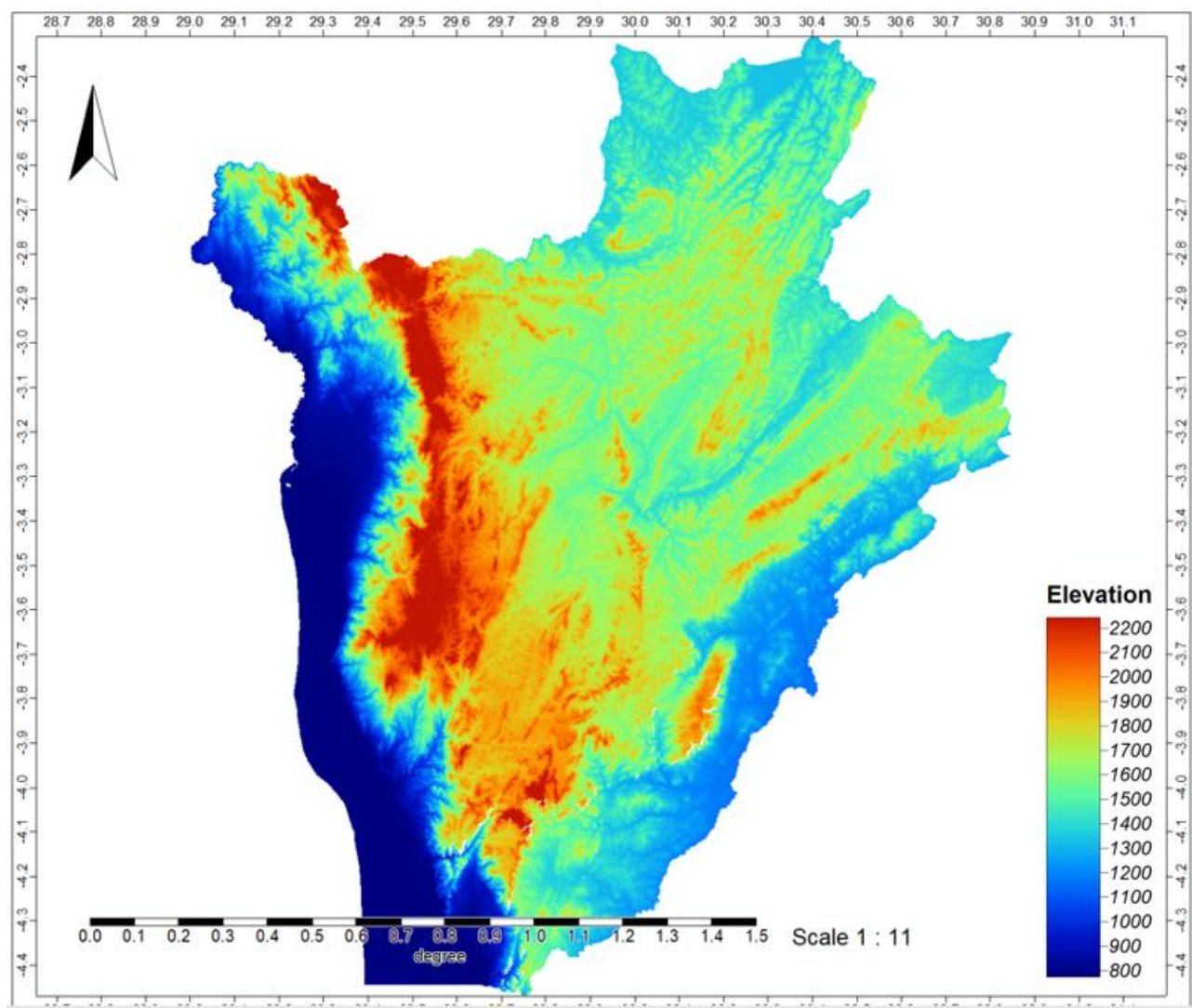


Рис 3.1. Карта рельефа Бурунди с указанием высоты над уровнем моря.

Как видно из рис. 3.1, полученного в результате обработки спутниковых снимков, Бурунди имеет гористый рельеф. Самые низкие районы находятся на западе Бурунди. На западе страны, точнее, на равнине Имбо, высота над уровнем моря очень низкая (около 800 м). При этом эта равнина находится непосредственно рядом с самой высокой по отношению к уровню моря территорией (более 2200 м над уровнем моря), поэтому в случае дождя равнина Имбо будет гораздо больше подвержена наводнениям, так как дождевая вода легко стекает на самый низкий уровень. Более того, равнина Имбо непосредственно граничит с озером Танганьика, а это подразумевает, что уровень грунтовых вод находится близко к поверхности земли, что является ключевым фактором, определяющим риск наводнений в этом районе. Западные

склоны хребта Конго – Нил также будут подвержены сильной эрозии, поскольку эта горная цепь образует одни из самых заметных склонов.

Как видно на этом снимке, на востоке и севере страны находится впадина (низменность), высота которой составляет почти 1200 м над уровнем моря. Восточная впадина граничит на западе с горным хребтом, высота которого достигает 2000 м. Как видно на рис. 3.1, с запада на восток от восточной впадины тянутся умеренно крутые склоны. Судя по физическому состоянию восточной впадины, в западной части она может подвергнуться эрозии, однако остальная часть этого региона будет гораздо более благоприятной для сельскохозяйственной деятельности, поскольку здесь не так много склонов. Кроме того, в регионе имеются реки, отводящие более или менее нормальное для земледелия количество воды. Этот регион будет подвержен затоплению только в случае сильных дождей, которые приведут к выходу крупных рек региона из берегов [72, 83].

Северная впадина граничит с юга с центральными плато. В этом районе нет крутых склонов. Однако, как видно на рис. 3.1, в этом районе имеется несколько небольших озер. Эти небольшие озера могут быть полезны для сельскохозяйственной деятельности, но в случае сильных дождей здесь может произойти сильное наводнение, вызванное переливом воды.

Средняя высота центральной части, как видно на снимке, составляет 1500 м. В этом регионе нет крутых склонов, поэтому он не подвержен наводнениям, за исключением случаев сильных дождей. Здесь есть несколько небольших гор с более или менее умеренными склонами.

Используя спутниковые снимки, были произведены расчеты, чтобы понять ориентацию склонов Бурунди и четко определить места, которые будут наиболее подвержены затоплению, и места, наиболее подверженные эрозии.

С помощью цифровой модели рельефа с использованием растровых слоев спутниковых снимков была рассчитана ориентация различных склонов, образованных различными горами Республики Бурунди. Ориентация склонов выражается в градусах и имеет значения от 0° до 360°. Значение 0° или 360°

соответствует ориентации на север, значение  $180^\circ$  – ориентации на юг, значение  $90^\circ$  – ориентации на восток, а значение  $270^\circ$  – ориентации на запад [48, 65].

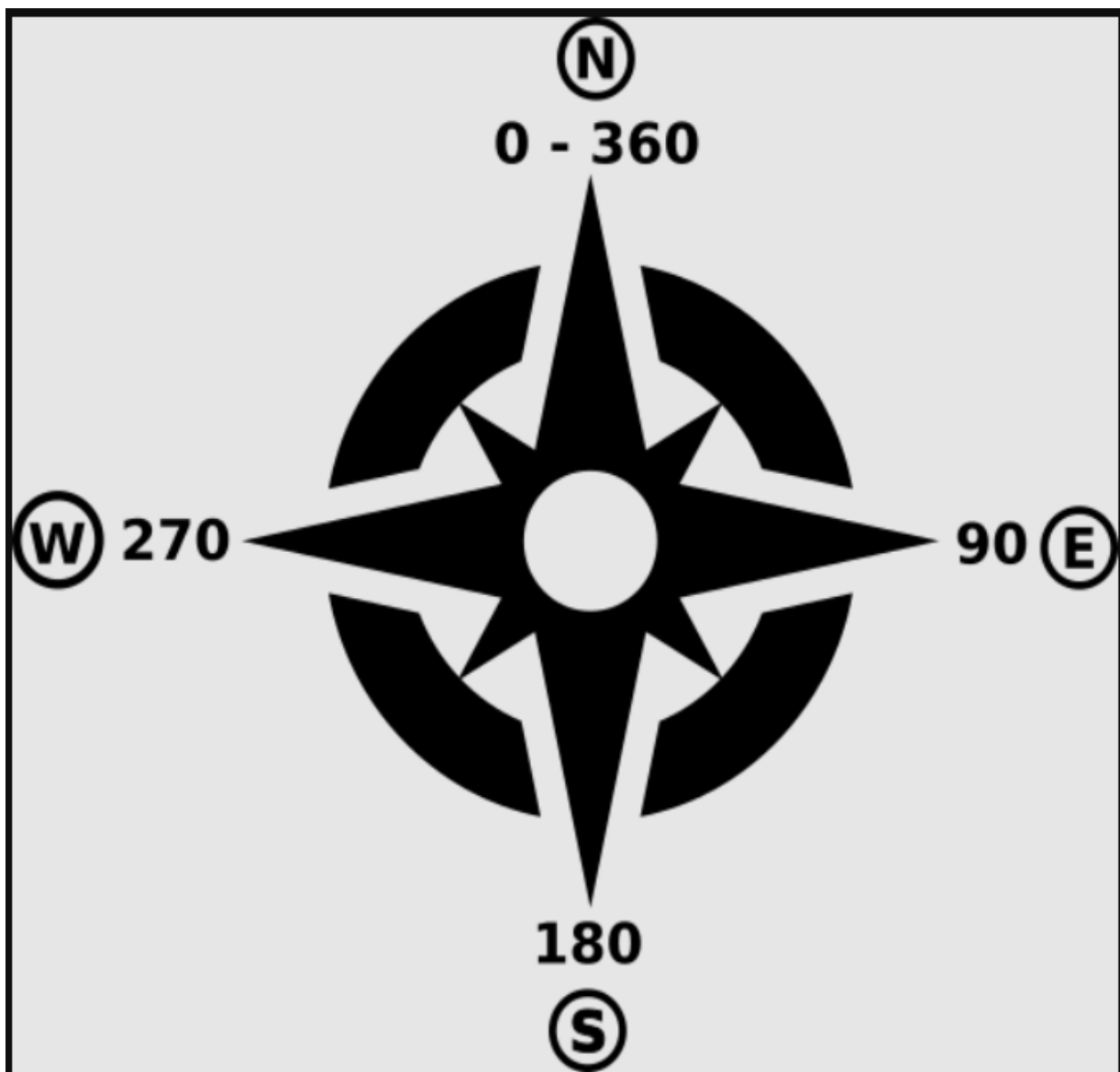


Рис 3.2. Значения экспозиции.

Как видно из рис. 3.2, если значение экспозиции находится в диапазоне от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , склон обращен на северо-восток. Когда значение экспозиции находится в диапазоне от  $90^\circ$  до  $180^\circ$ , склон обращен на юго-восток. Если значение экспозиции находится в диапазоне от  $180^\circ$  до  $270^\circ$ , склон ориентирован на юго-запад. Если значение экспозиции находится в диапазоне от  $270^\circ$  до  $360^\circ$ , склон ориентирован на северо-запад.

Для эффективного управления рисками, связанными с осадками и особенно с эрозией, знание ориентации склонов является более важным, поскольку позволяет лицам, принимающим решения, знать, где требуется срочная помощь для предотвращения эрозии. Кроме того, чем круче склон поля и чем длиннее склон, тем выше риск эрозии. Водная эрозия также возрастает с увеличением длины склона из-за увеличения стока. Объединение небольших полей в более крупные часто приводит к увеличению длины склонов. Поскольку вода течет быстрее, увеличивается перенос наносов, что приводит к росту риска эрозии и размыва [44, 6].

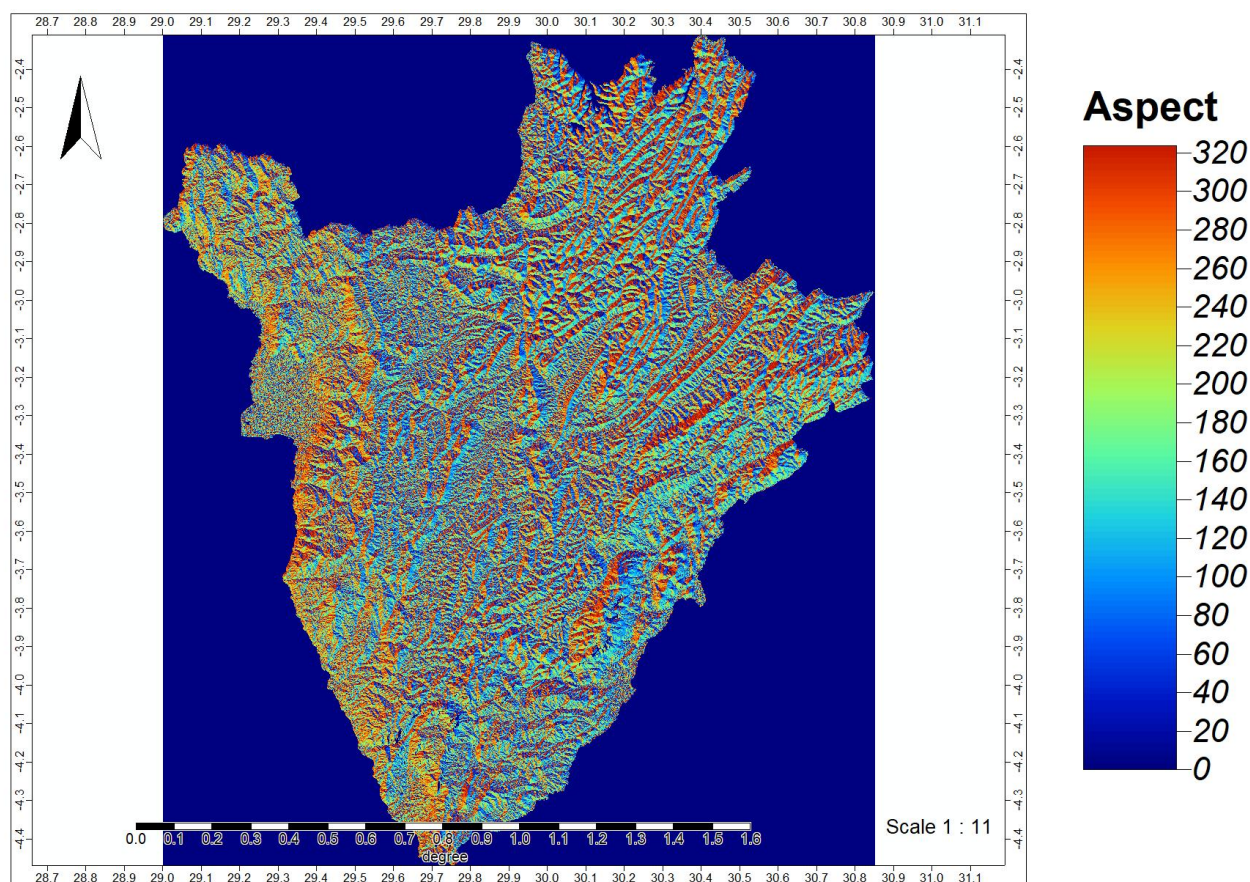


Рис. 3.3. Карта экспозиций склонов Бурунди.

На рис. 3.3 показана ориентация различных склонов. С помощью этой карты можно определить участки со склонами и, кроме того, узнать ориентацию склона, что дает информацию о расположении областей стока. Для хорошего представления о склонах рекомендуется составлять карту



небольшого населенного пункта, чтобы отчетливо были видны все его особенности [6, 7].

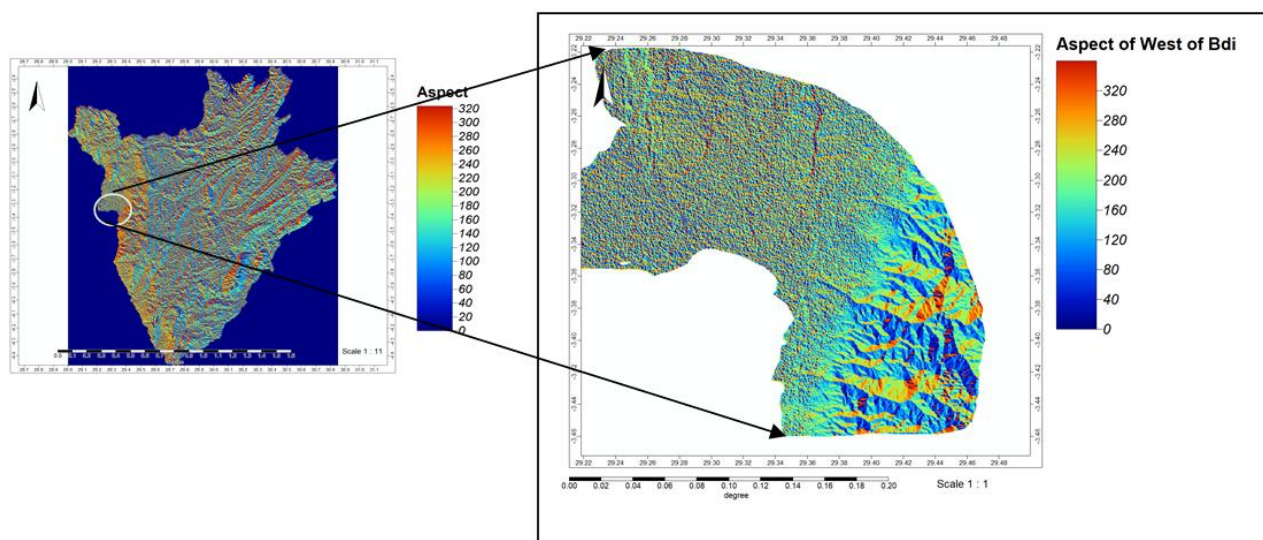


Рис. 3.4. Карта экспозиции склонов небольшой территории города на западе Бурунди.

Как показано на рис. 3.4, чем меньше населенный пункт, тем лучше изображение. Поскольку оно отображает небольшой населенный пункт, на нем очень легко наблюдать все детали ориентации склонов, а это играет большую роль в управлении эрозией, так как позволяет лицам, принимающим решения, выбрать наиболее подходящее место для проведения мероприятий по замедлению стока воды. Например, в горах очень полезно определять ориентацию склонов, чтобы знать, где необходимо провести лесовосстановление, поскольку лесовосстановление и восстановление растительности также может замедлить поток поверхностных вод к главному водосбору бассейна; в этом случае сток сохраняется дольше. Кроме того, сток замедляется в бассейнах, содержащих естественные водохранилища, такие как озера и болота, или искусственные водохранилища [6, 7].

Для эффективного управления рисками, связанными, например, с эрозией и наводнениями, очень важно рассчитать индекс пересеченности рельефа для того, чтобы определить, какие поверхности являются равнинными, какие – холмистыми, а какие – умеренно холмистыми. Знание этого индекса позволит определить, какой тип сельскохозяйственной деятельности следует применять в

данном регионе. Этот индекс может быть измерен в метрах или дуговых секундах для точек сетки, отстоящих друг от друга на 30 дуговых секунд (926 м на экваторе или любом меридиане) [6, 7, 33].

Индекс пересеченности рельефа характеризует разницу высот между соседними ячейками цифровой модели рельефа. Данная модель растровой функции используется для создания визуального представления индекса устойчивости рельефа с помощью данных о рельефе. Результаты интерпретируются следующим образом [39]:

- 0 – 80 м – плоская поверхность земли;
- 81 – 116 м – почти ровная поверхность;
- 117 – 161 м – слегка неровная поверхность;
- 162 – 239 м – умеренно неровная поверхность;
- 240 – 497 м – умеренно холмистая поверхность;
- 498 – 958 м – очень неровная поверхность;
- 959 – 4367 м – очень холмистая поверхность.

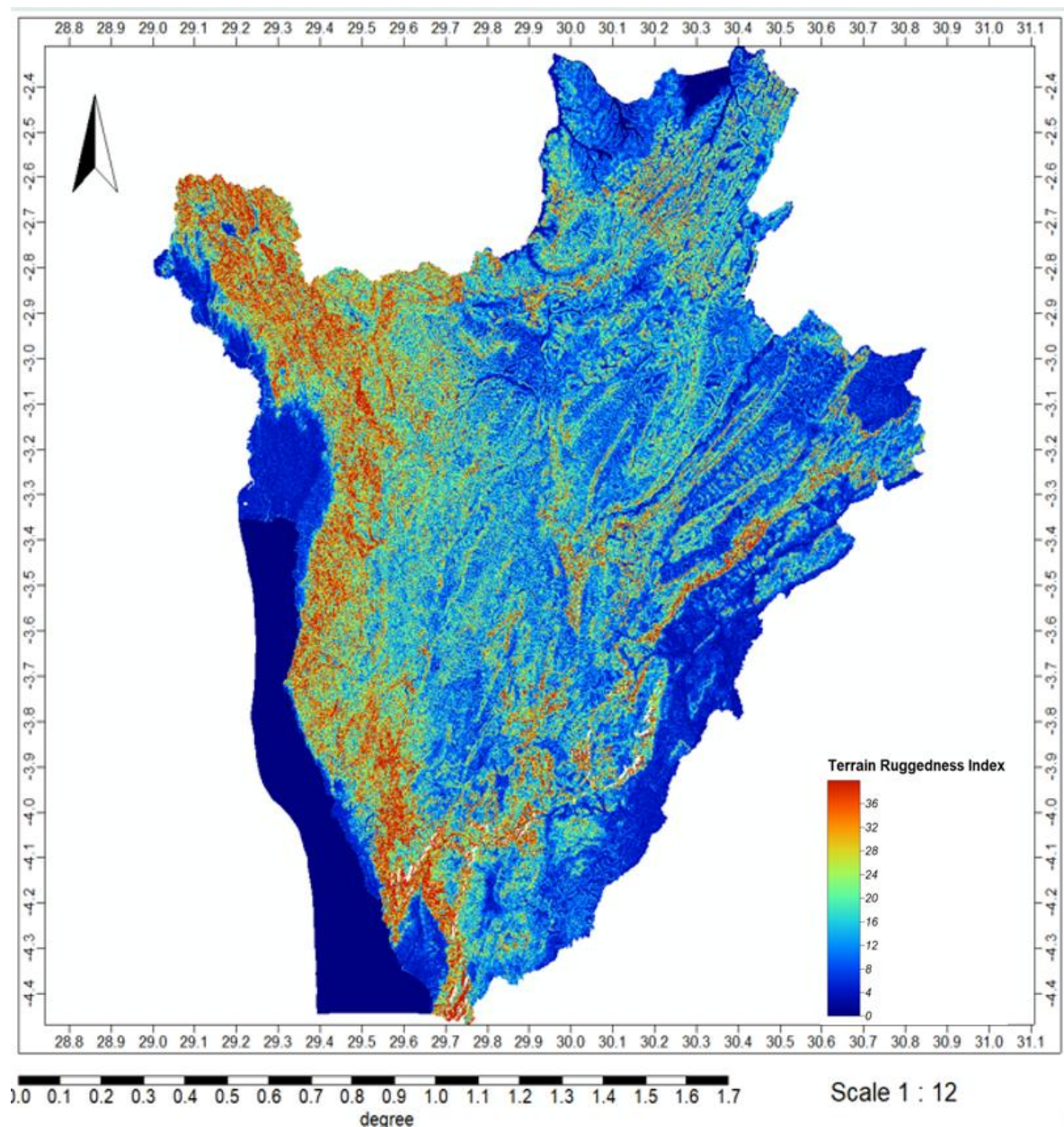


Рис. 3.5. Карта индекса пересеченности рельефа Бурунди.

Как показано на рис.3.5, Бурунди имеет весьма разнообразный индекс пересеченности. За исключением равнины Имбо (участок, граничащий с озером Танганьика), рельеф Бурунди в целом усиливается с востока на запад. В центральной части страны значительная часть территории умеренно холмистая, но западная часть, занятая хребтом Конго – Нил, очень холмистая, так как индекс этого региона чуть выше 20 угловых секунд, т.е. чуть выше 600 метров.

Для управления рисками наводнений и эрозии топографический позиционный индекс является одним из важнейших элементов для определения положения желаемой точки относительно положения окружающих точек.

Топографический позиционный индекс помогает различать такие топографические объекты, как вершина холма, дно долины, обнаженный хребет, плоская равнина, верхний или нижний склон. Он рассчитывается путем сравнения высоты каждого пикселя с его соседями. Количество соседей, с которыми производится сравнение (т.е. размер окрестности), имеет большое значение [39, 53].

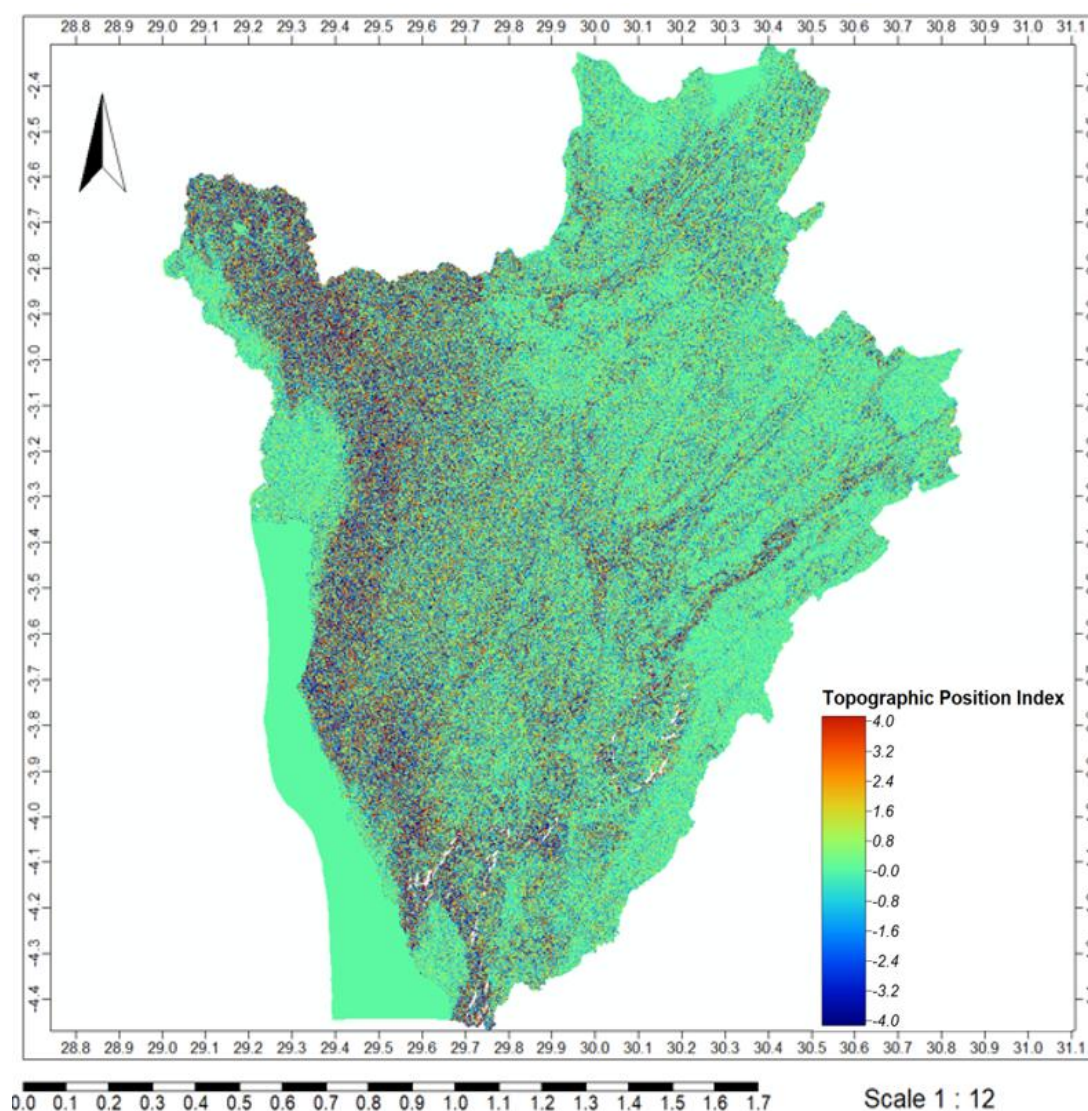


Рис. 3.6. Карта топографического позиционного индекса рельефа Бурунди.

Как показано на рис. 3.6, по топографическому позиционному индексу Бурунди имеет самые высокие вершины на западе страны в той части, где расположен хребет Конго – Нил, поскольку индекс топографического положения составляет почти 4. Топографический позиционный индекс – это синоним разницы по отношению к средней высоте над уровнем моря, который является абсолютным местным индексом топографического положения. И как мы видим, в центре страны этот индекс относительно средний – 0,8, что означает наличие гор, которые не имеют большой высоты [39, 53, 68].

### **3.2. Анализ гидрометеорологических данных**

Сельскохозяйственная деятельность в Республике Бурунди постоянно подвержена рискам, в основном вызванным наводнениями, эрозией и засухой.

Независимо от особенностей рельефа все почвы подвержены естественной эрозии. В сельском хозяйстве под эрозией почвы понимается истончение верхнего слоя почвы в результате действия природных сил воды и ветра, а также в результате сельскохозяйственных работ, таких как обработка почвы. Независимо от того, что является причиной эрозии – вода, ветер или обработка почвы, – в любом случае происходит ее разрыхление, перемещение и отложение. Плодородный, живой верхний слой почвы, богатый органическими веществами, переносится на другие участки земли или накапливается там с течением времени, или удаляется от земли в дренажные системы. Эрозия почвы снижает продуктивность земли и способствует загрязнению водотоков, водно-болотных угодий и прилегающих озер [38].

Явление может развиваться медленно и оставаться относительно незамеченным. Но оно может происходить и с угрожающей скоростью, приводя к большим потерям пахотных земель. Уплотнение почвы, истощение органического вещества почвы, ухудшение структуры почвы, плохой внутренний дренаж, засоление и подкисление почвы – причины ухудшения состояния почвы, ускоряющие эрозию [13].

Чем интенсивнее и продолжительнее ливень, тем выше риск эрозии. Удар дождевых капель о поверхность почвы приводит к разрушению агрегатов и рассеиванию почвенных частиц. Самые легкие частицы, включая очень мелкий песок, ил, глину и органические вещества, легко уносятся брызгами дождевой воды и стоками. Более крупные частицы песка и гравия требуют большей энергии, передаваемой дождевыми каплями, и большего потока [37, 38].

Смещение почвы под воздействием дождя обычно сильнее и легче наблюдается во время кратковременных сильных бурь. Хотя эрозия, вызываемая длительными ливнями меньшей интенсивности, обычно не столь эффективна и очевидна, как при сильных штормах, тем не менее, со временем она может привести к значительным потерям почвы [37, 53].

На склонах вода начинает стекать с поверхности почвы, когда избыток воды уже не может быть поглощен почвой или когда вода задерживается на поверхности. Сток усиливается, когда скорость инфильтрации снижается из-за образования почвенной корки или уплотнения почвы. На сельскохозяйственных землях наибольший сток происходит в сезон дождей, когда почва обычно насыщена влагой [37, 68].

Наводнение представляет собой затопление обычно сухой территории пресной или соленой водой. Наводнение может быть обычным или катастрофическим явлением и происходить медленно или очень быстро.

Среди причин наводнений в Республике Бурунди можно назвать следующие:

- Прямой разлив реки в ее основном русле после сильных дождей.
- Непрямой перелив воды из водоема (поверхностного или подземного) в результате повышения уровня грунтовых вод или перетекания воды по трубам.
- Накопление сточных вод после обильных осадков. Дренажные и инфильтрационные возможности территории могут оказаться недостаточными для отвода поступающей воды, которая затем накапливается. Это явление

усугубляется, когда земля становится непроницаемой (урбанизация) без создания адекватной дренажной сети.

– Разрушение гражданского инженерного сооружения, такого как дамба или плотина. Неправильная конструкция, отсутствие технического обслуживания или слишком большое количество воды могут привести к прорыву защитного сооружения, а затем и к его разрушению. Последствия, как правило, катастрофические, поскольку поток воды внезапный и очень мощный.

Известно также, что в некоторых регионах Бурунди наблюдается больше засухи, чем в других, и это считается препятствием для развития сельскохозяйственной деятельности.

Существует несколько видов засухи:

– Метеорологическая (или атмосферная) засуха (осадков выпадает слишком мало в течение длительного периода времени).

– Сельскохозяйственная засуха (содержание влаги в почве на глубине одного метра слишком мало для обеспечения хороших условий выращивания). Этот тип засухи возникает даже при нормальном количестве осадков и зависит от характера почвы, методов ведения сельского хозяйства и вида выращиваемых растений. Например, рис и кукуруза потребляют много воды.

– Гидрологическая засуха (понижение уровня воды в водотоках, т.е. грунтовых вод в водоемах и поверхностных вод в реках, озерах и ручьях, называемом маловодьем). Одним из факторов, вызывающих этот тип засухи, является недостаточное количество осадков, но также и проницаемость почвы, в которой находятся водотоки, определяющая способность воды просачиваться и стекать.

Основными естественными (метеорологическими) причинами засухи являются дефицит воды и высокие температуры.

Если в сухой сезон выпадает недостаточное количество осадков, запасы воды не могут пополняться так, как это необходимо для поддержания гидрологического баланса.

Если же недостаток воды сопровождается высокими температурами, то происходит естественное увеличение испарения и эвапотранспирации с растений, что приводит к иссушению и эрозии почвы. А глобальное потепление, как правило, способствует этим явлениям.

В случае засухи запасы воды оказываются слишком малыми для нормального ведения полива сельскохозяйственных культур, падает сельскохозяйственное производство, происходит снижение или даже потеря урожая [76, 112].

В случае засухи уровень воды в реках, озерах и грунтовых водах становится очень низким, что приводит к ограничению подачи воды для полива сельскохозяйственных культур, бытовых нужд (например, для полива огородов) и промышленных нужд. В сельской местности вода может быть нормирована или даже отключена.

Учитывая, что сельскохозяйственная деятельность в основном зависит от осадков и температурного режима, используя данные об осадках и температуре, собранные на различных станциях с 2010 г. по 2018 г., с помощью анализа этих данных удалось определить различные сельскохозяйственные сезоны в соответствии с особенностями осадков и температуры.

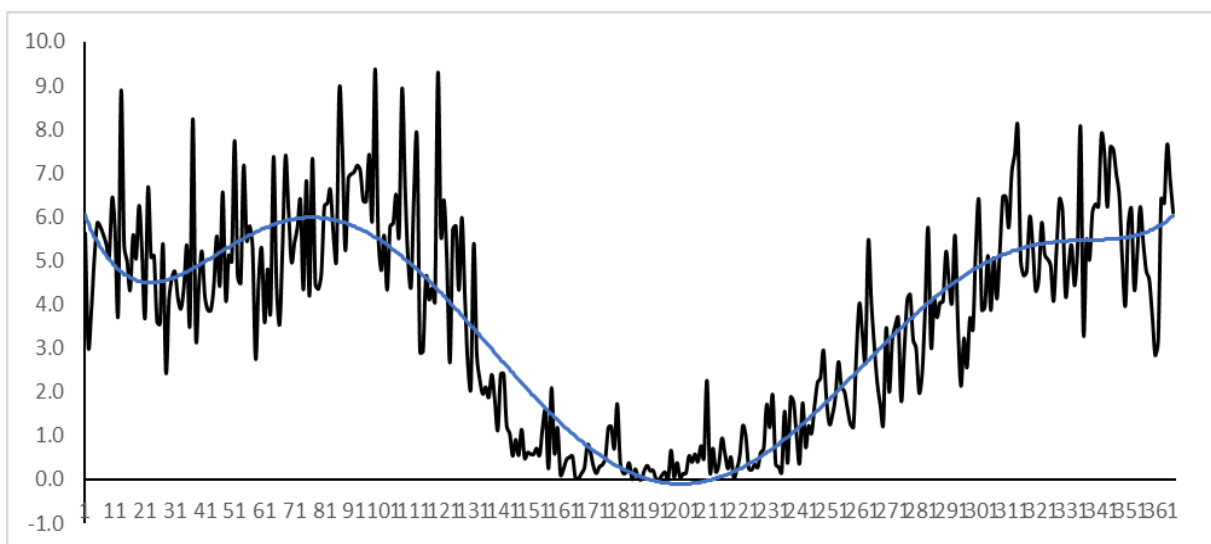


Рис. 3.7. Годовой ход количество осадков.



Как видно из рис. 3.7, с учетом характера изменения количества осадков в течение года в Бурунди выделяются три основных периода: с февраля по май, с июня по август и с сентября по январь.

В первой фазе, с февраля по май, количество осадков увеличивается, достигая максимума в марте, и вновь уменьшается в мае. Эта фаза соответствует сельскохозяйственному сезону, известному в Бурунди как сезон В.

Вторая фаза, т.е. с июня по сентябрь, как видно из графика на рис. 3.7, считается периодом, характеризующимся отсутствием осадков. В этот период в течение трех месяцев осадков практически не бывает. Эта фаза соответствует сухому сезону, известному в Бурунди как сельскохозяйственный сезон С.

Третья фаза, с сентября по январь, – это время возвращения выпадения достаточных осадков. На графике видно, что для этого периода характерно увеличение количества осадков с течением времени. Минимум наблюдается в сентябре, максимум – в декабре. В январе наблюдается уменьшение количества осадков. Ссылаясь на типы сезонов, наблюдаемые в Бурунди, можно сказать, что эта фаза соответствует сельскохозяйственному сезону, известному как сезон А [76, 112].

Для эффективного управления рисками, связанными с сельскохозяйственной деятельностью, кроме режима осадков, важно знать температурный режим территории, чтобы хорошо понимать, какое влияние он может оказывать на возникновение тех или иных явлений, ответственных за результат сельскохозяйственной деятельности [15, 79].

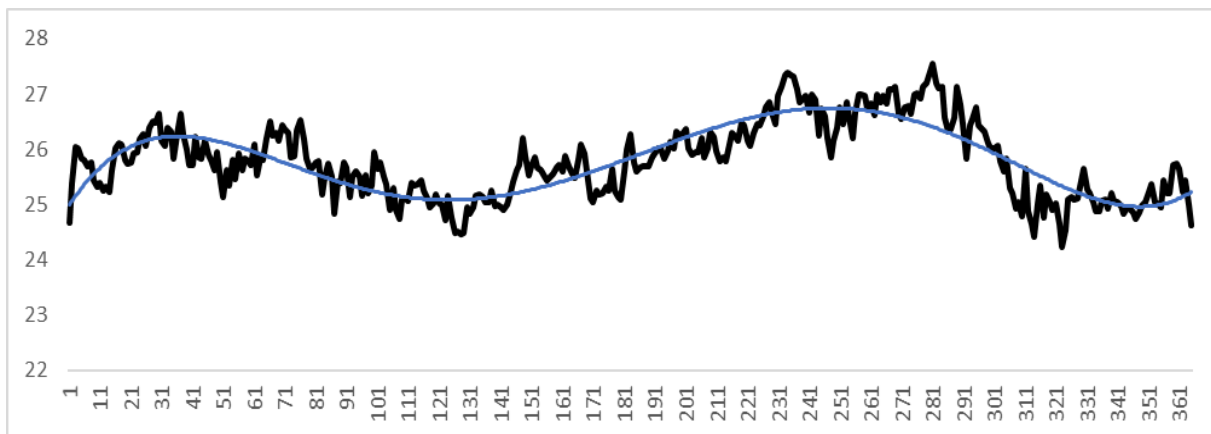


Рис. 3.8. Годовой ход температуры.

Согласно рис. 3.8, можно отметить, что характер эволюции температуры подтверждает разделение года на три сезона, поскольку, год можно разделить на три сезона, которые соответствуют трем сельскохозяйственным сезонам.

Как видно из сравнения графика на рис. 3.8 с графиком на рис. 3.7, в сезон дождей температура снижается, а в сухой сезон – повышается. Это подтверждается тем, что между температурным режимом и режимом осадков существует отрицательная корреляция, так как коэффициент корреляции составляет  $-0,4$ .

Долгосрочное управление рисками, создающими угрозу сельскохозяйственному сектору, требует знания пространственного распределения осадков и температуры. Для проведения противоэрозионных и противопаводковых мероприятий необходимо знать, где выпадает большое количество осадков, для эффективного управления засухой – где выпадает недостаточное количество осадков, а также, где средняя температура является высокой.[28, 108].

Используя метеорологические данные, собранные по всей территории Бурунди за период с 2010 г. по 2018 г., удалось получить пространственное представление распределения данных о температуре и количестве осадков.

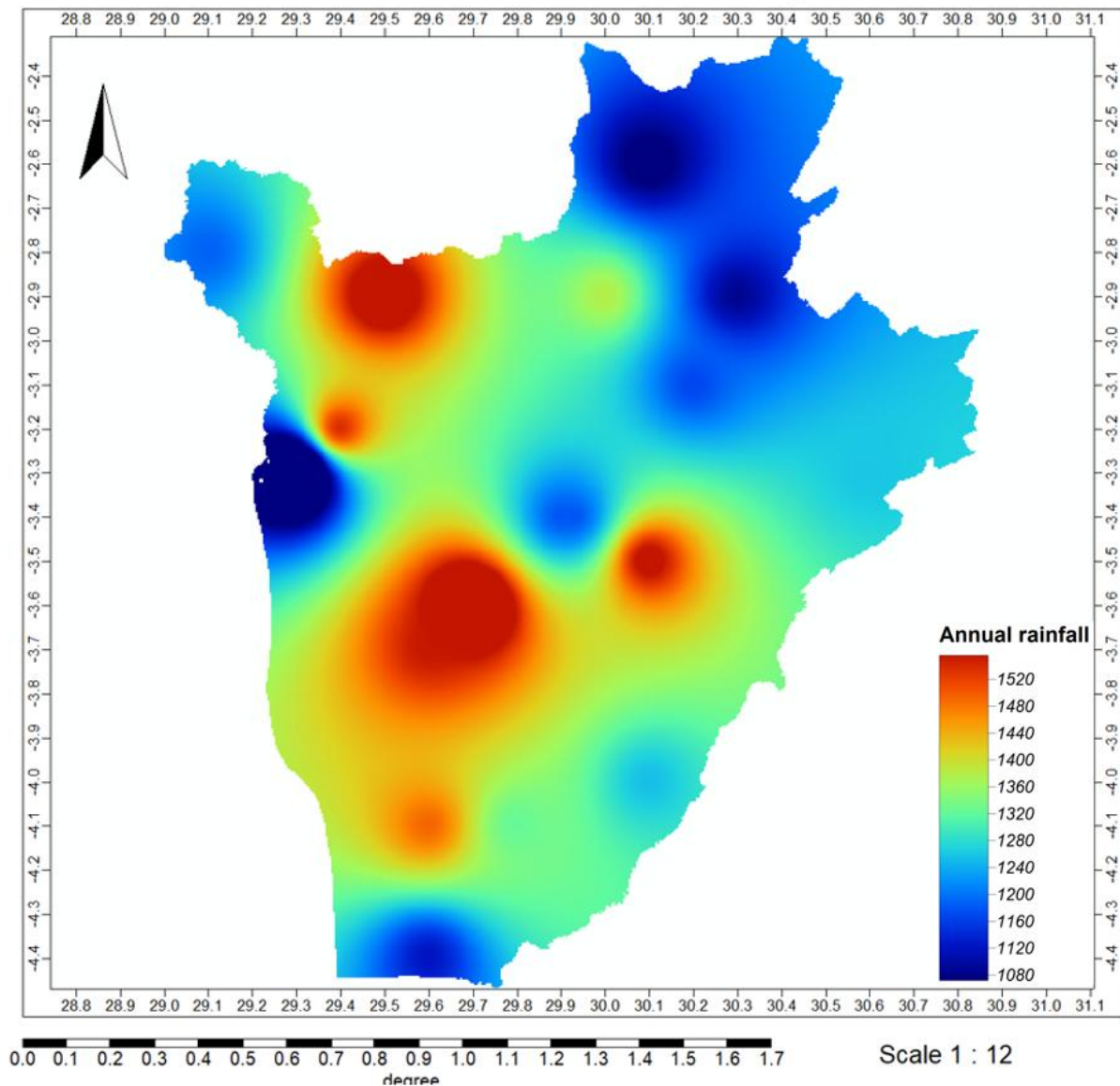


Рис. 3.9. Среднегодовое количество осадков.

На рис. 3.9 хорошо видно, где выпадает большое количество годовых осадков, а где – недостаточное. В западном регионе Бурунди имеются очаги повышенного количества осадков, причем эти осадки выпадают на участках с высоким рельефом и наиболее значительными уклонами. Используя рис. 3.1, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 и 3.9, можно установить, почему западный равнинный регион страны (равнина Имбо) часто подвергается наводнениям по сравнению с остальной территорией страны. С помощью этих же рисунков можно определить, почему этот регион часто подвергается эрозии: во-первых, он имеет крутые склоны; во-вторых, здесь выпадает большое количество осадков [28, 108].

Для северо-восточного региона характерно минимальное количество осадков по сравнению с общим распределением осадков, поэтому закономерно, что этот регион будет подвержен сельскохозяйственной засухе.

С учетом разделения года на три сезона, как видно из результатов, представленных на рис. 3.7 и рис. 3.8, для облегчения принятия решений по управлению сезонными рисками необходимо также знать пространственное распределение осадков по сезонам.

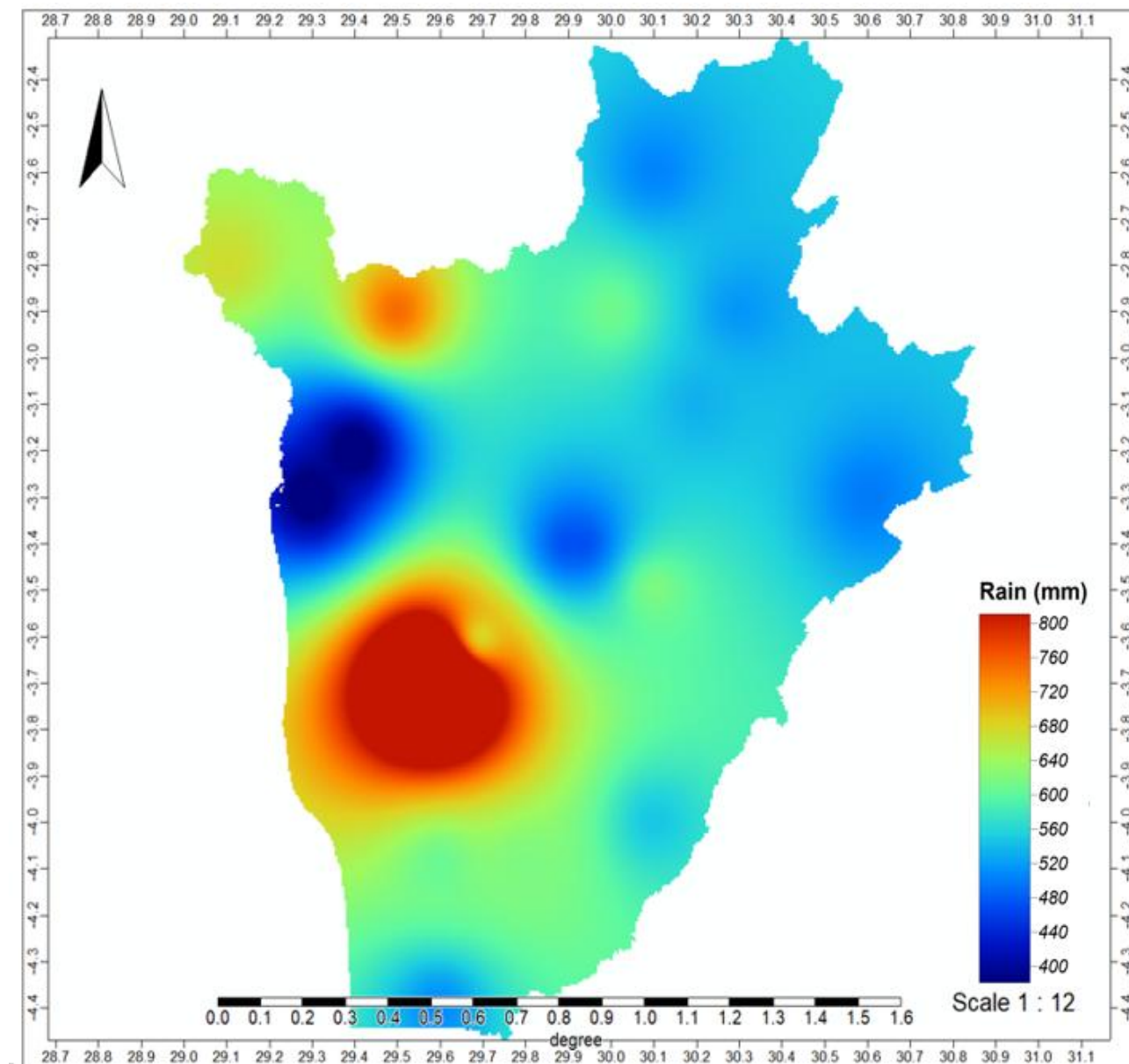


Рис. 3.10. Среднее количество осадков с февраля по май в мм.

Согласно распределению осадков (рис. 3.10) для сельскохозяйственного сезона В, в период с февраля по май, в Бурунди выпадает от 400 мм до 800 мм

осадков. Наибольшее количество осадков выпадает на юго-западе, наименьшее – на северо-востоке, а на северо-западе наблюдается очаг минимального количества осадков. Заметно, что в центральном регионе страны выпадает относительно среднее количество осадков [28, 108].

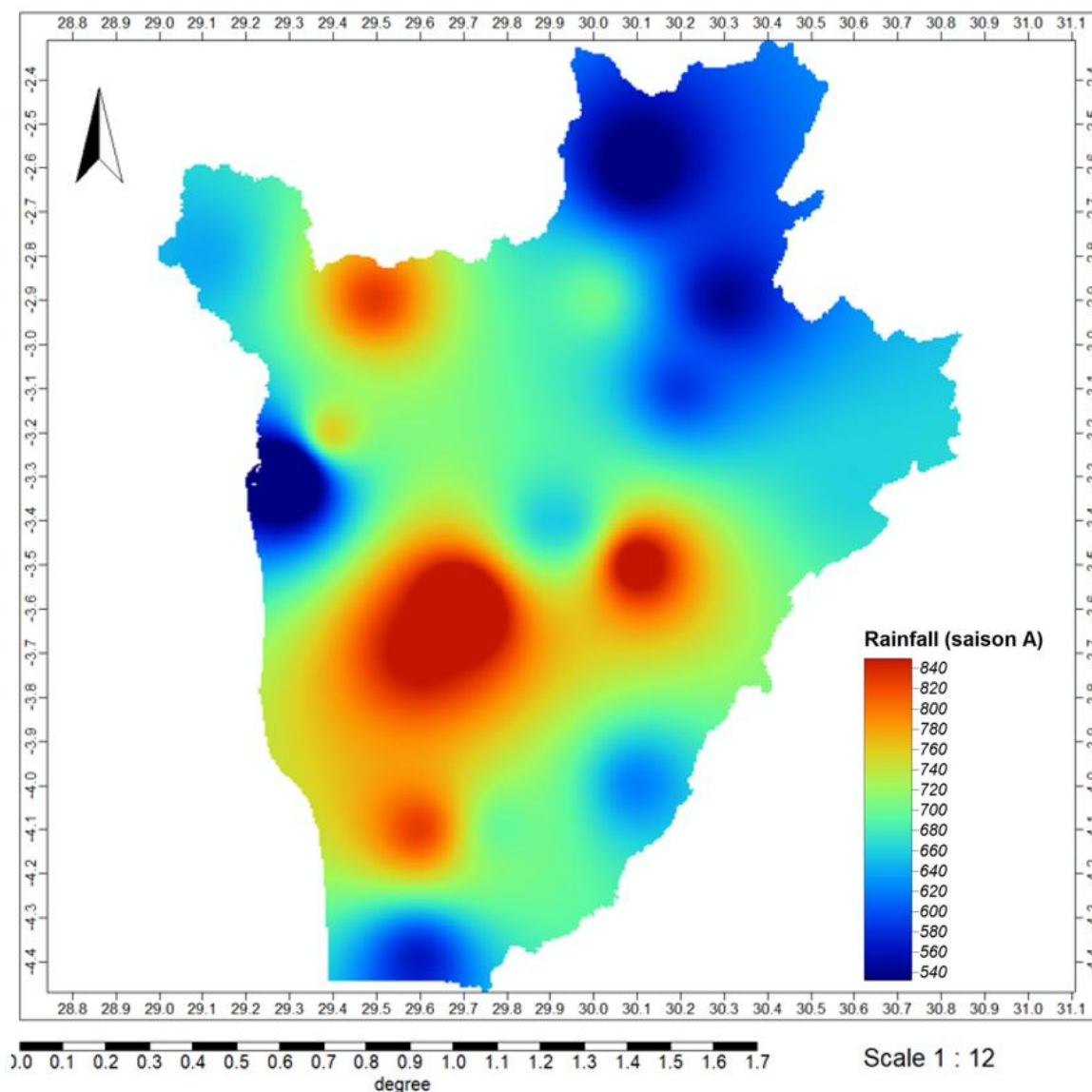


Рис. 3.11. Среднее количество осадков с сентября по январь в мм.

На рис. 3.11 показано распределение осадков в сезон А, т.е. с сентября по январь. В этот период в Бурунди наблюдаются очаги повышенного количества осадков на западе страны и в некоторых центральных районах. В соответствии с тем же распределением осадков относительно минимальное количество осадков наблюдается на северо-востоке, юге и на небольшом участке на западе страны.

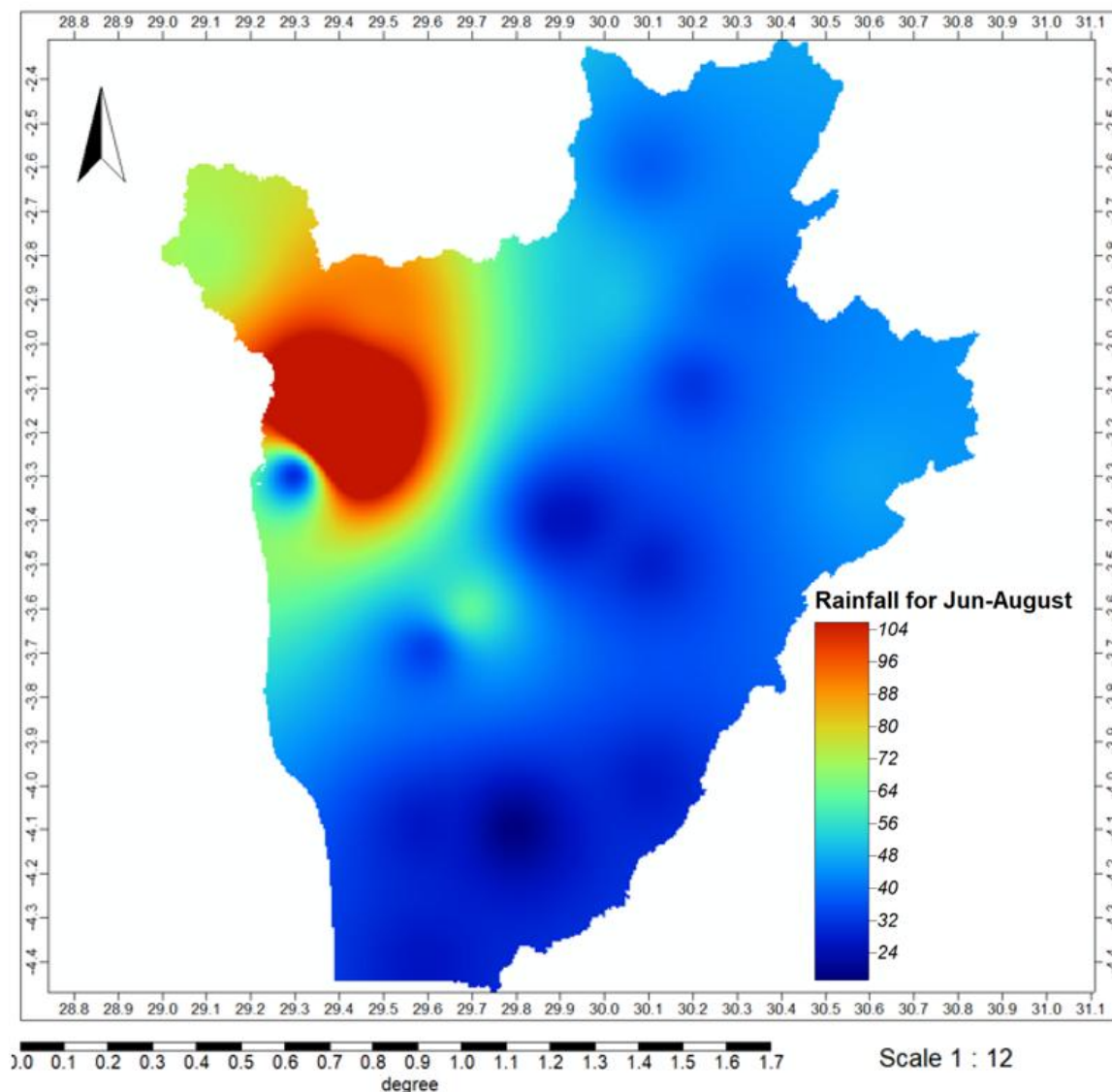


Рис. 3.12. Среднее количество осадков с июня по август в мм.

В период с июня по август, как видно из рис. 3.12, выпадает очень мало осадков по сравнению с другими сезонами. Среднее количество осадков в этот период колеблется от 20 до 100 мм, что недостаточно для некоторых видов сельскохозяйственной деятельности. Сельскохозяйственная деятельность в этот период возможна только при орошении или на болотах вдоль берегов, где легче поливать растения [28, 69, 108].

Как было сказано выше, высокие температуры увеличивают испарение воды, делая почву более сухой. В свою очередь, уменьшение количества водяного пара в воздухе способствует его нагреванию. Говоря об управлении рисками в сельскохозяйственном секторе, необходимо провести детальный

анализ температурного режима, чтобы выявить, какие регионы наиболее подвержены засухе [28, 69, 108].

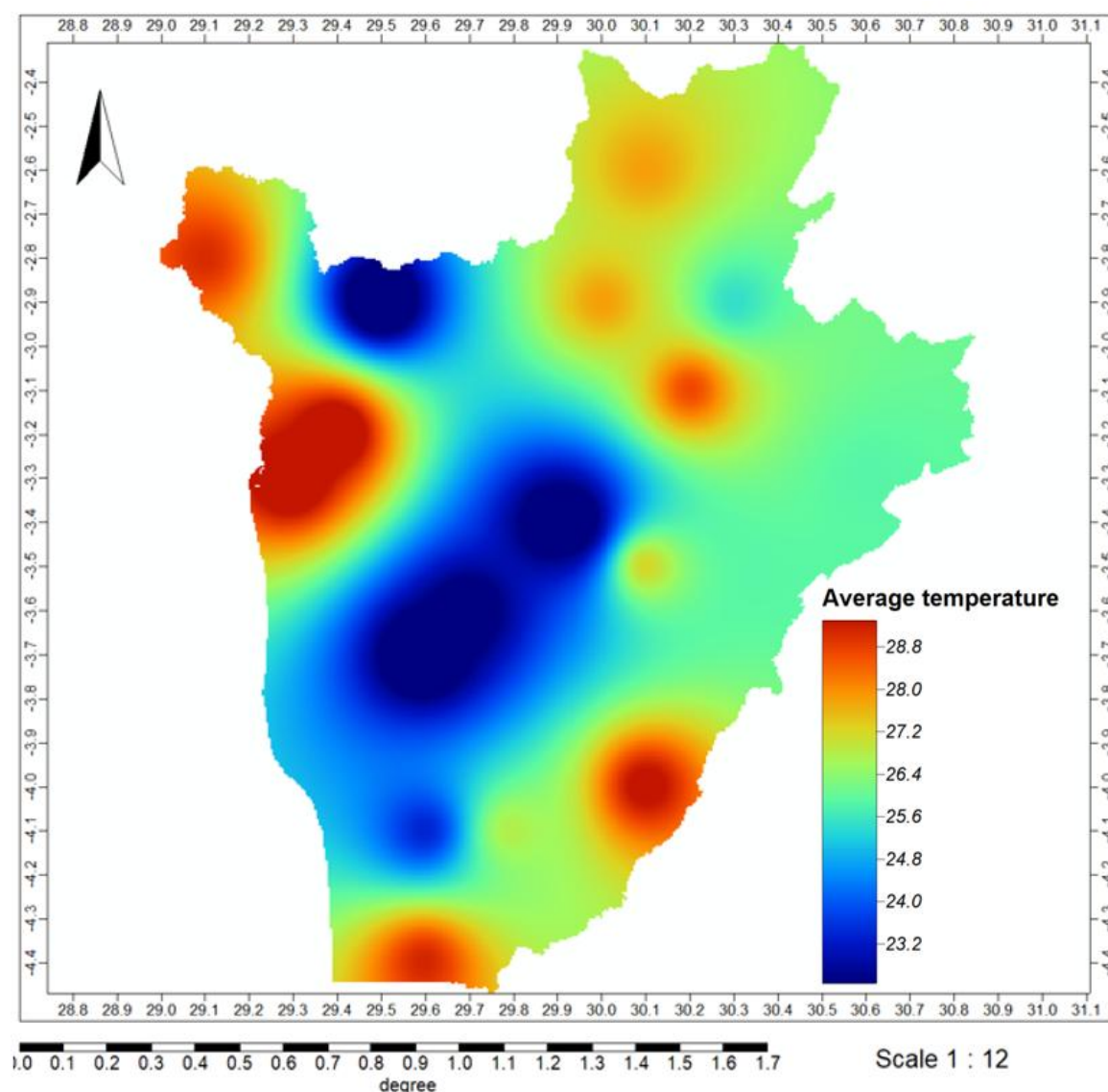


Рис. 3.13. Режим среднегодовой температуры.

Как видно из пространственного распределения режима среднегодовой температуры, температура в Республике Бурунди колеблется от 22 °С до 30 °С. На северо-западе страны находится очаг высокой температуры по отношению ко всей стране, где температура может достигать 30 °С, а с севера на юг, проходя через область, занимаемую хребтом Конго – Нил, и центральную часть страны, наблюдается относительно низкая температура. На юго-западе имеются небольшие очаги высоких температур. В то же время в северо-восточной части страны более или менее высокая температура [28, 69, 108].

На основании рис.3.10 и рис. 3.13 можно выявить регионы, которые будут подвержены засухе с учетом распределения осадков и температуры. Северо-восточный регион страны будет подвержен засухе в гораздо большей степени, чем все остальные регионы страны, так как в нем, как правило, выпадает минимальное количество осадков в год и наблюдается высокая средняя температура.

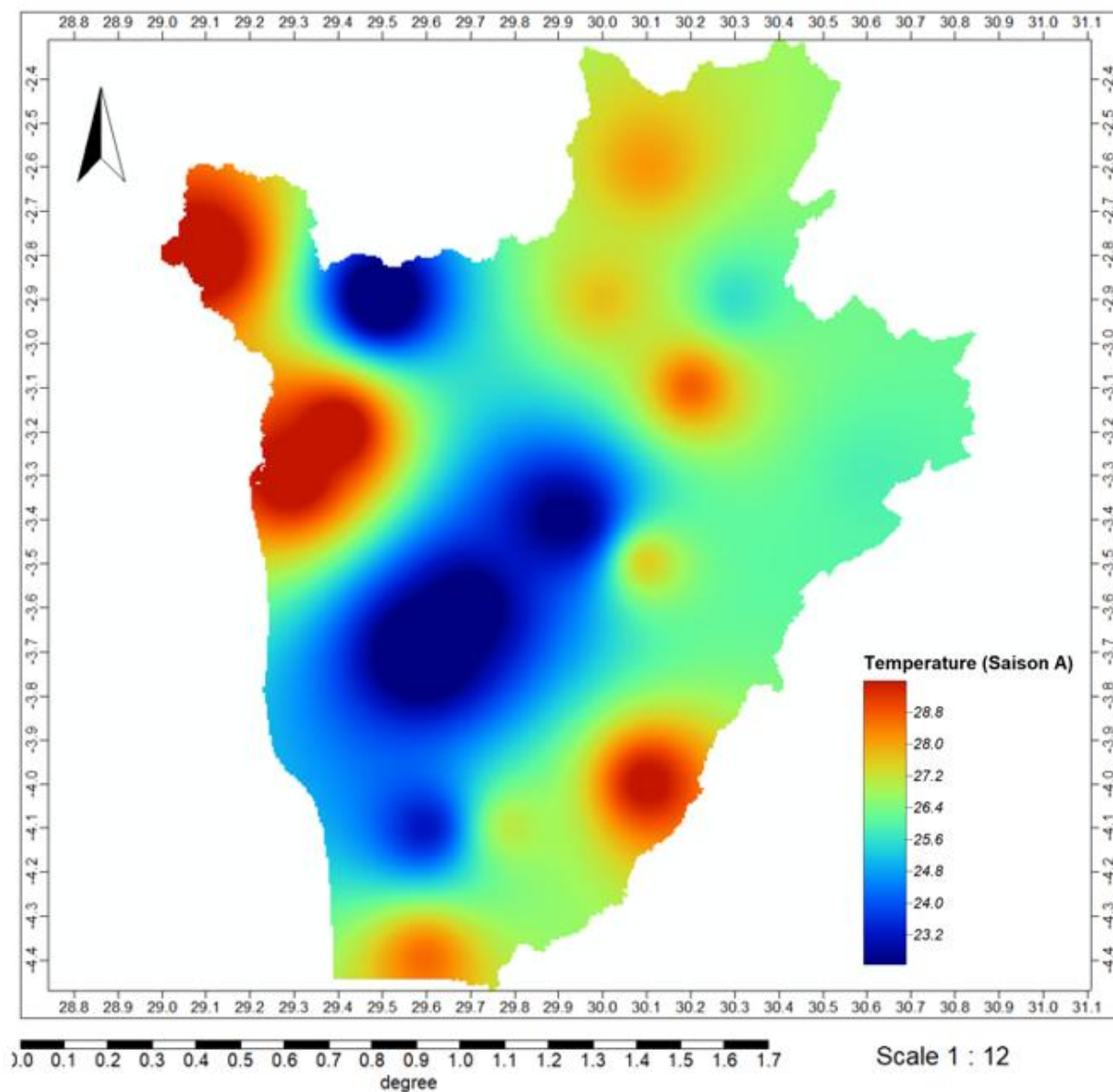


Рис. 3.14. Температурный режим с сентября по январь.

Если проанализировать рис. 3.14, то можно увидеть, что для распределения температур над Республикой Бурунди в сухой сезон, т.е. с сентября по январь, повторяется тот же сценарий, который был представлен на



рис. 3.13. Точно так же заметно, что на северо-западе страны имеется остров высоких температур по сравнению с остальной территорией страны, а с севера на юг, проходя через область, занимаемую хребтом Конго – Нил, и центральную часть страны, наблюдается относительно низкая температура. На юго-западе имеются небольшие очаги высоких температур. При этом северо-восточная часть страны менее жаркая [28, 69, 108].

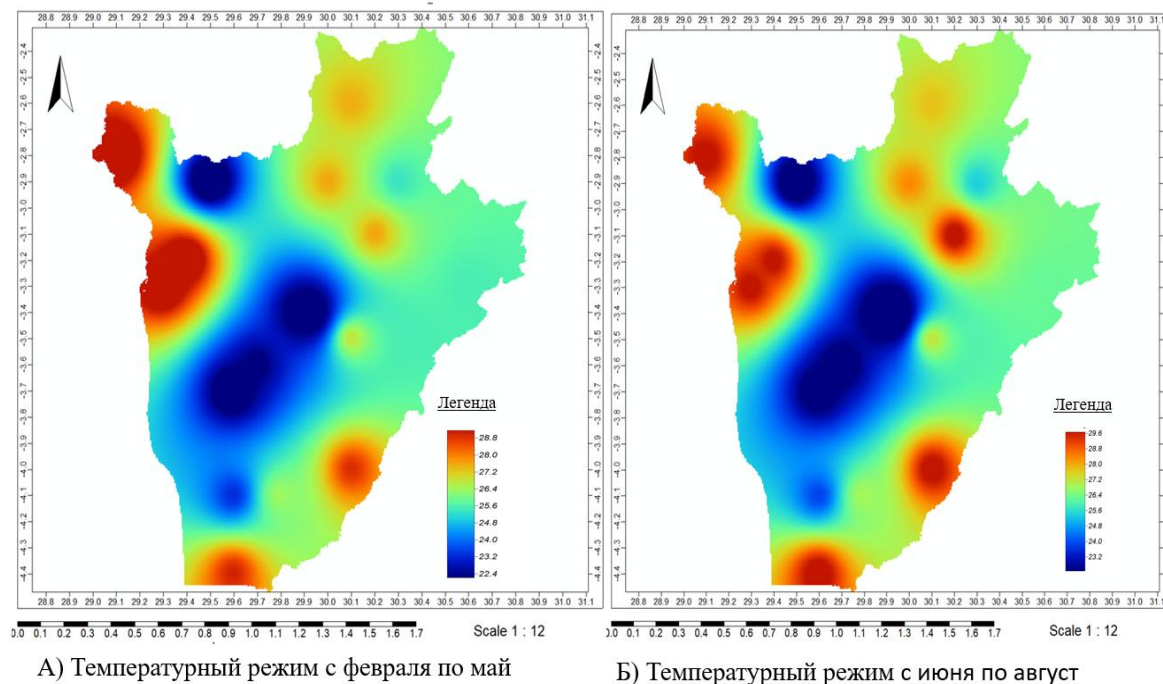


Рис.3.15. Температурный режим: а) с февраля по май; б) с июня по август.

Анализируя распределение температуры за период с февраля по май (рис. 3.15 а) и распределение температуры с июня по август (рис. 3.15 б), можно сделать вывод, что распределение температуры по территории страны одинаково. Кроме того, на рис. 3.13 и рис. 3.14 видно, что температура не сильно меняется в зависимости от времени года. Разница в температуре в разные сезоны незначительна и составляет порядка нескольких сотен после запятой. Это означает, что средняя температура является квазистатистической, так как она не изменяется существенно в зависимости от времени года [28, 69, 108].

### 3.3. Статистический анализ данных

В рамках поставленных задач необходимо провести статистический анализ данных о температуре и количестве осадков, собранных в различных регионах Бурунди, чтобы получить представление об их поведении на основе ключевых показателей для эффективного управления рисками в сельскохозяйственном секторе [31, 88].

Этот анализ был проведен для определения подходящих средств прогнозирования и управления рисками, связанными с температурой и осадками. Поскольку температура и осадки варьируются в каждом году по-разному в зависимости от месяца и сезона, ряды данных о температуре и осадках были проанализированы в соответствии с тремя сельскохозяйственными сезонами, которые встречаются в Бурунди, и каждый параметр был проанализирован как случайный процесс. Каждый случайный процесс состоит из девяти реализаций, соответствующих 9 годам анализируемых данных [31, 88].

Пусть дискретный случайный процесс представлен временным рядом

$X(n); X(n-1); \dots; X(n-M)$ , среднее определяется как:

$$\mu_x(n) = M\{X(n)\} \quad (3.1),$$

где  $M\{\cdot\}$  – оператор математического ожидания. Аналогично, автокорреляция принимает форму [5]:

$$r(n, n-k) = M\{X(n)X^*(n-k)\}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.2),$$

где звездочка обозначает комплексное сопряжение. Функция автоковариации записывается:

$$c(n, n-k) = M[X(n) - \mu_x(n)][X(n-k) - \mu_x(n-k)]^*; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.3).$$

Процесс является строго стационарным, если все его моменты не зависят от времени. Считается, что процесс является слабостационарным, или стационарным в широком смысле, если:

$$\mu_x(n) = \mu \quad \forall n \quad (3.4)$$

$$r(n, n-k) = r(k) \quad \forall n \quad (3.5)$$

Пусть  $X$  – это ряд значений размера  $n$ , среднего  $m$  и стандартного отклонения  $S$ . Сравнение наблюдаемого среднего значения ( $m$ ) с теоретическим значением  $\mu$  позволяет рассчитать коэффициент Стьюдента по следующей формуле:

$$t_{\phi} = \frac{\mu - \mu_0}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (3.6).$$

Был рассчитан критерий Стьюдента для проверки наличия стационарности в рядах данных, используемых для выбора подходящего метода управления рисками.

Итак, нужно сравнить среднее значение  $\mu$  совокупности с нормальным распределением и неизвестным стандартным отклонением  $\sigma$  с заданным значением  $\mu_0$ . Нулевой гипотезой является  $H_0: \mu = \mu_0$ , т.е. предварительно предполагается, что среднее значение равно  $\mu_0$ . Теперь подставим данные под нулевую гипотезу [23, 31]. Рассматривается выборка размером  $n$  из этой совокупности  $(X_1, \dots, X_n)$ . Среднее значение оценивается по эмпирическому среднему:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.7).$$

При нулевой гипотезе распределение среднего  $\bar{X}$  также распределяется нормально со стандартным отклонением  $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . Поскольку дисперсия  $\sigma^2$  неизвестна, она оценивается с помощью собственного несмещенного показателя:

$$S_n^{*2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2 \quad (3.8).$$

По теореме Кокрана при нулевой гипотезе, следуя закону  $\chi_u$  Квadrата с  $n-1$  степенями свободы, применяется следующая тестовая статистика:

$$Z = \sqrt{n} \frac{\bar{X}_n - \mu_0}{S_n^*} \quad (3.9).$$

Статистика  $Z$  следует распределению Стьюдента с  $n-1$  степенью свободы. Выбираем риск  $\alpha$ , обычно равный 0,05 или 0,01, и вычисляем реализацию тестовой статистики:

$$Z = \sqrt{n} \frac{\bar{X}_n - \mu_0}{S_n^*}, \text{ или } S_n^* = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2} \quad (3.10).$$

Пусть необходимо проверить  $H_0 = \mu = \mu_0$ . Таким образом, если  $|Z|$  больше квантиля порядка  $1 - \frac{\alpha}{2}$  закона Стьюдента с  $n-1$  степенями свободы, то отвергается нулевая гипотеза [23, 21].

Случай, когда нужно проверить  $H_0 = \mu \leq \mu_0$ : если  $Z$  больше квантиля порядка  $1 - \alpha$  закона Стьюдента с  $n-1$  степенями свободы, то отвергается нулевая гипотеза.

Случай, когда нужно проверить  $H_0 = \mu \geq \mu_0$ : если  $Z$  меньше квантиля порядка  $\alpha$  закона Стьюдента с  $n-1$  степенями свободы, то отвергается нулевая гипотеза.

Чтобы узнать, является ли разница значимой, необходимо сначала прочесть в  $t$ -таблице критическое значение  $t_k$ , соответствующее риску  $\alpha$  для одной степени свободы  $d$ :

$$d = n - 1 \quad (3.11).$$

Если абсолютное значение  $t_\phi$  больше критического значения  $t_k$ , то разница значима. Если нет, то она не является значительной.

Процесс считается строго стационарным, если  $t_\phi$  меньше критического значения  $t_k$ .

Чтобы убедиться, прослеживается ли какая-то связь между величиной температуры и количеством осадков, был рассчитан коэффициент корреляции.

Коэффициент корреляции – это особая мера, которая количественно определяет силу линейной связи между двумя переменными в корреляционном анализе. Коэффициент обозначается  $r$  в отношении корреляции.

Для двух переменных формула сравнивает расстояние каждой точки данных от среднего значения переменной и использует это, чтобы указать, насколько точно связь между переменными соответствует воображаемой линии, проведенной в данных. Это то, что подразумевается под «корреляциями о линейных отношениях» [23].

Корреляция включает только две переменные и не дает информации о возможных связях, содержащих больше данных. Этот анализ не обнаружит выбросы, присутствующие в данных, и не сможет обнаружить криволинейные отношения [9, 23].

Коэффициент корреляции может быть представлен формулой:

$$r_{xy} = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 * (\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (3.12).$$

Коэффициент корреляции  $r$  представляет собой безразмерное значение от  $-1$  до  $1$ .

Анализируя полученные значения автокорреляционной функции для температуры и для количества осадков для трех сезонов, можно сделать вывод о наличии четкой линейной тенденции в исследуемом временном ряду, что дает основание утверждать, что эти параметры не зависят от времени.

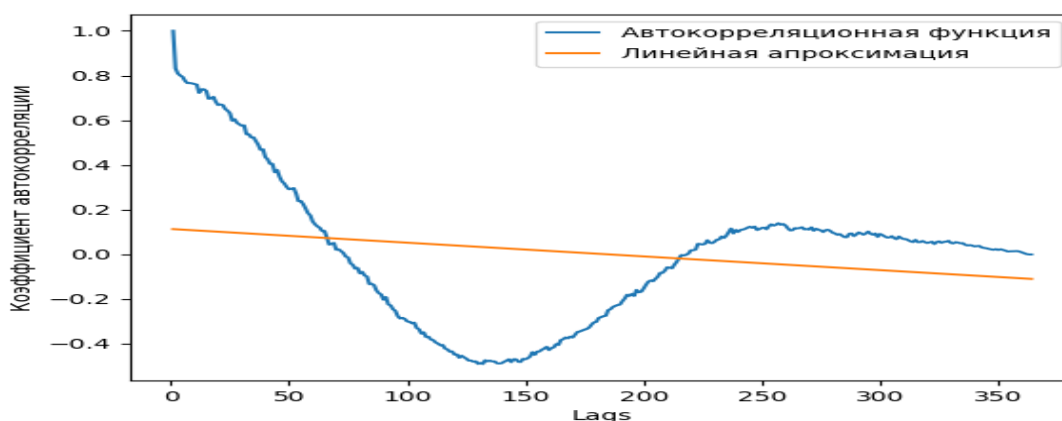


Рис.3.16. Автокорреляционная функция количества осадков в Бурунди.

Поскольку автокорреляция используется для измерения связи между текущими и прошлыми рядами значений, она показывает, какие прошлые значения

наиболее полезны для прогнозирования будущих значений. На рис. 3.16 видно, что при прогнозировании поведения ряда осадков можно делать прогноз на 20 дней вперед, так как связь между текущим значением и значением 20 днями ранее сильная, поскольку в этом диапазоне коэффициент автокорреляции больше 0,7, что означает наличие сильной связи. Если проанализировать также линейную функцию аппроксимации автокорреляционной функции, то хорошо заметно, что она практически не изменяется, так как весь коэффициент автокорреляции меняется в диапазоне от 0 до 0,14. Это позволяет сделать вывод о том, что годовой ряд осадков является стационарным.

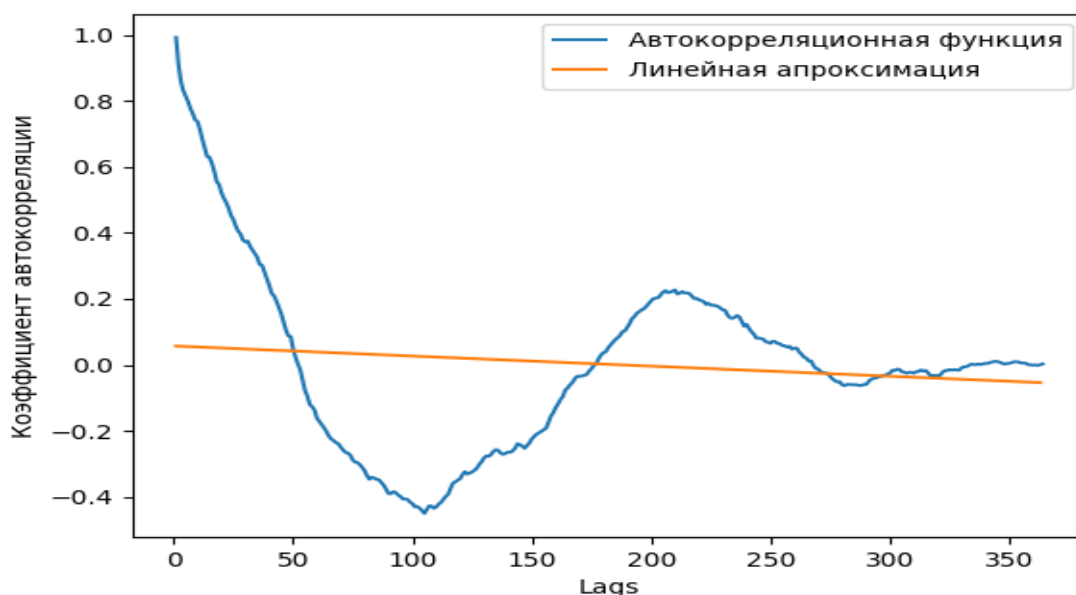


Рис.3.17. Автокорреляционная функция температур в Бурунди.

На рис. 3.17 отчетливо видно, что между текущими и предыдущими значениями температуры существует сильная связь, поскольку коэффициент автокорреляции остается высоким до десятого дня. Это означает, что, используя текущие значения температуры, можно предсказать ее поведение на период 10 дней. Анализ линейной функции аппроксимации автокорреляционной функции приводит к выводу, что температурный ряд является стационарным, так как значение автокорреляции изменяется только в пределах 0,058 – 0,049.

Также необходимо провести анализ коэффициента автокорреляции по регионам, а также по сезонам, чтобы установить связь между значениями температуры и осадков по сельскохозяйственным сезонам в Бурунди, а также по регионам.

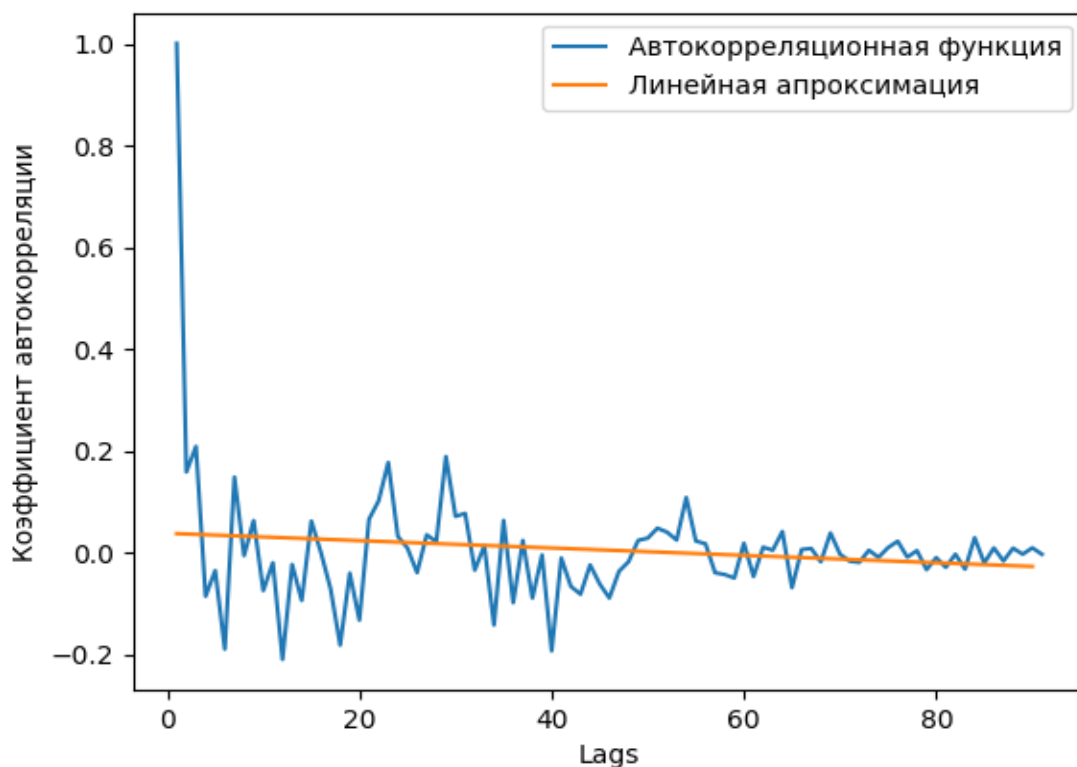


Рис.3.18. Автокорреляционная функция количества осадков в Бугарама (Бужумбура) в сезон С.

В районе Бугарамы не наблюдается сильной связи между текущим значением осадков и предыдущими значениями. Это можно объяснить тем, что значение коэффициента отсутствия корреляции заметно уменьшается между первым и предыдущим значением. Несмотря на большое отличие первого значения от предыдущего, видно, что линейная функция аппроксимации значений автокорреляции позволяет сделать вывод том, что осадки являются стационарными для данного региона в течение сельскохозяйственного сезона С. Эта стационарность обосновывается тем, что линейная функция

автокорреляции остается практически неизменной в течение этого периода, поскольку вариация значений очень незначительна (от 0,031 до 0,037).

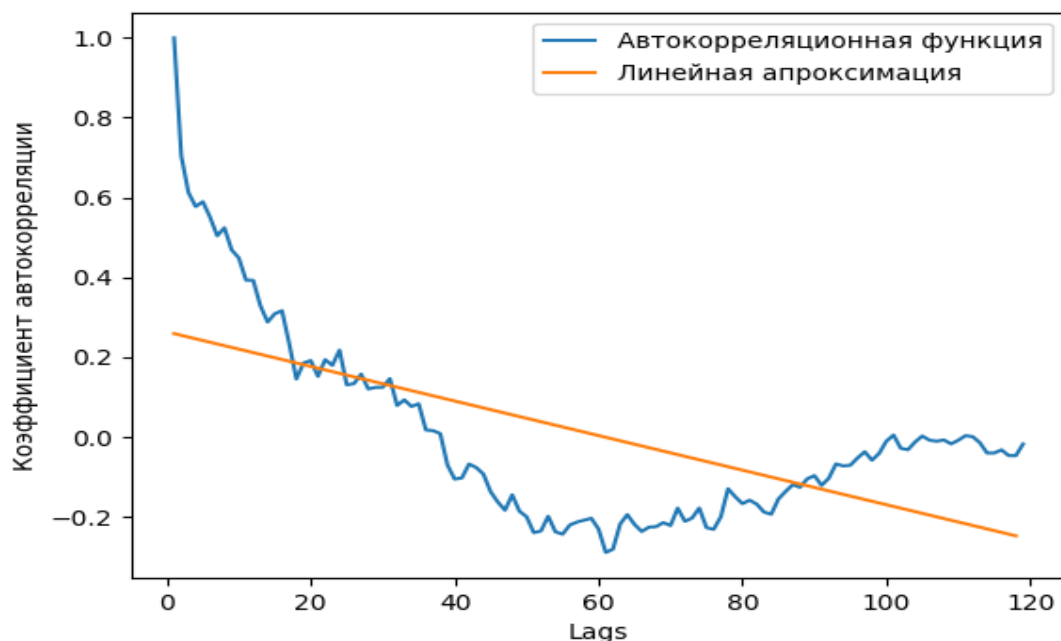


Рис. 3.19. Коэффициент автокорреляции для температуры для сезона В в Кирундо.

Как показано на рис. 3.19, существует тенденция к уменьшению коэффициента автокорреляции в зависимости от времени, о чем свидетельствует линейная функция коэффициентов автокорреляции температурных данных в течение сезона В, то есть с мая по август. Однако эта тенденция также слабая, что свидетельствует о том, что температура практически квазистационарна.

Аналогичный анализ позволил нам сделать вывод, что ряды количества осадков и ряды температур являются квазистационарными или стационарными в различных регионах Бурунди и в разные сезоны.

Учитывая, что для управления рисками, угрожающими сельскохозяйственному сектору Бурунди, необходимо построить модель на основе фактических данных (температура, количество осадков и др.), очевидно, что она должна учитывать особенности динамики имеющихся данных. Для этого необходимо знать распределение Стьюдента, которое используется для



проверки гипотез о значимости регрессионных моделей. Это позволит оценить математическое ожидание нормально распределенных случайных величин при малом объеме выборки, а также значимость разницы между средними двух выборок. Таким образом, с помощью этого критерия удастся определить, являются ли данные стационарными или нет.

Для проверки стационарности использовался коэффициент значимости 5%. В результате анализа данных о температуре и количестве осадков, собранных на различных метеостанциях в Бурунди, было установлено, что эти данные являются стационарными. Ниже приведены некоторые результаты, полученные с помощью анализа по критерию Стьюдента [9, 21].

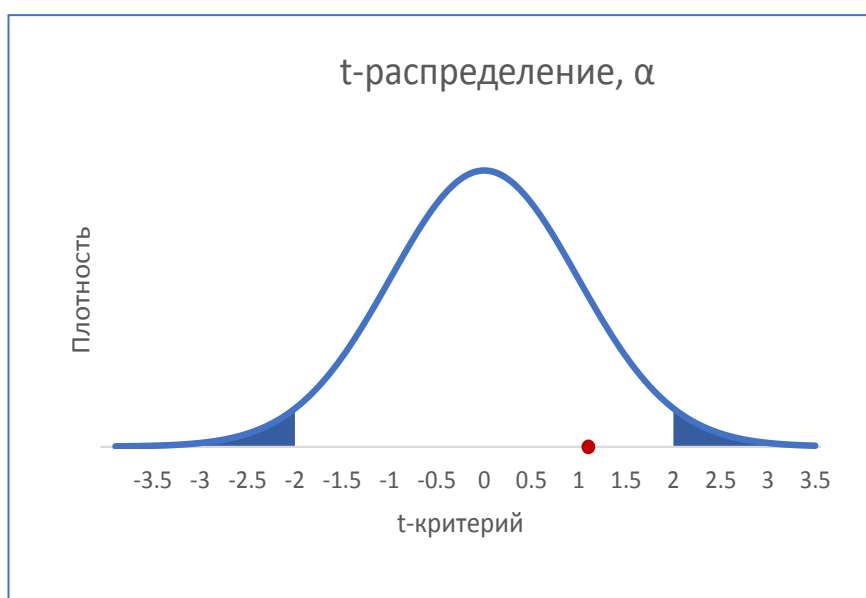


Рис. 3.20. t-распределение в Кирундо по температуре.

Как показано на рис. 3.20, значение средней температуры для используемой выборки данных остается в пределах доверительного интервала. Выборка соответствовала средней температуре температурных данных, полученных за период с июня по август 2018 г., а теоретическое значение средней температуры было связано со среднегодовой температурой, установленной в результате анализа температурных данных с 2010 г. по 2018 г.

## Расчет t-Критерия по данным температуры в Кирундо

Показатель	Значение
$\mu$	27.6
$X_{\text{ср}}$	27.7
n	92
s	0.9
tфакт	1.06574
$\alpha$	0.05
d.f.	91
tкритич	1.986
p-value	0.289361

Как видно из результатов, приведенных в табл. 3.1, при среднем теоретическом значении 27.6 среднее значение для выборки со степенью свободы 91 составляет 27.7. Рассчитав значение критерия Стьюдента при стандартной ошибке 0,9, видно, что фактическое значение Стьюдента значительно ниже критического значения Стьюдента. Это подтверждает стабильность температуры для данной области, что означает ее стационарность [9, 21].

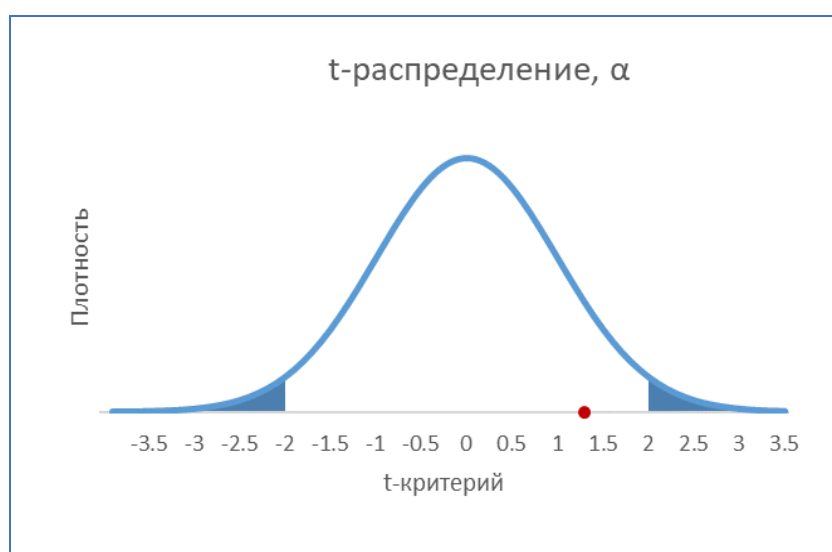


Рис. 3.21. t-распределение в Гитега по данным количества осадков.

Как представлено на рис. 3.21, значение среднесуточного количества осадков для используемой выборки данных остается в пределах доверительного интервала. Выборка соответствовала среднесуточному количеству осадков по данным о количестве осадков, полученным в период с сентября по январь 2016 г., а теоретическое значение среднесуточного количества осадков было связано со средним количеством осадков, полученным в результате анализа данных за 9 лет.

Таблица 3.2

Расчет t-Критерия по данным количества осадков в Гитега

Показатель	Значение
$\mu$	3.3
$X_{\text{ср}}$	3.4
n	153
s	0.94
tфакт	1.315885
$\alpha$	0.05
d.f.	152
tкритич	1.976
p-value	0.190194

Анализируя рассчитанное значение t-Стьюдента для количества осадков для района Гитега в сезон А, можно увидеть, что значение t-Стьюдента ниже критического значения t-Стьюдента, как показано на рис. 3.21 и в табл. 3.2, из чего можно сделать вывод о стационарности временного ряда количества осадков [9, 21].

Для всех сезонов и для обоих параметров было замечено, что значение t-Стьюдента ниже критического значения t-Стьюдента. Поскольку значение t-Стьюдента остается ниже критического значения t-Стьюдента, видно, что

температура и осадки не зависят от времени, следовательно, можно утверждать, что для временного ряда температуры и осадков существует стационарность.

Корреляционный анализ приводит к выводу об отсутствии сильной линейной связи между температурой и осадками.

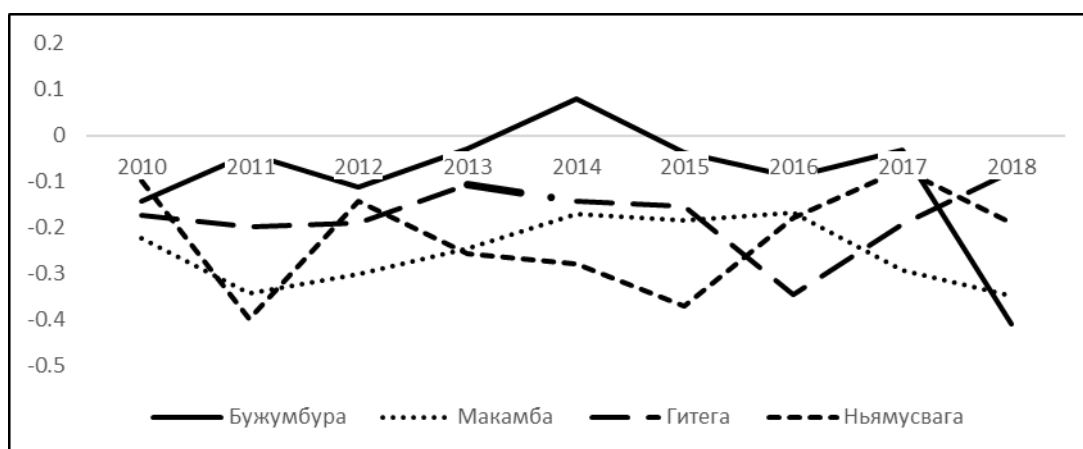


Рис 3.22. Графики коэффициентов корреляции между температурой и осадками для 4 регионов за сезон С.

Как видно из рис. 3.22, в анализируемых данных нет сильной линейной зависимости между температурой и осадками для сезона С. Аналогичный сценарий наблюдался при расчете коэффициентов корреляции между температурой и осадками для других сезонов [9, 21, 23].

Аналогично был проведен корреляционный анализ температуры и осадков, полученных в различных регионах. Результаты показали, что коэффициент корреляции в разных регионах неодинаков и имеет значения от  $-0,4$  до  $-0,1$ . Ссылаясь на стандартизованную классификацию коэффициентов корреляции, можно установить, что эта связь слабая, при этом отрицательное значение указывает на то, что температура и осадки движутся в противоположных направлениях.

Поскольку между температурой и осадками нет сильной корреляции, эти два параметра будут рассматриваться отдельно для прогнозирования рисков для сельскохозяйственной деятельности, вызванных температурой и осадками.

### Выводы по главе 3

Республика Бурунди имеет очень сложную структуру, что способствует возникновению рисков, обусловленных опасными климатическими явлениями, на большей части территории страны. Данные, полученные при наблюдении за высотой Бурунди, показывают, что на западе страны находятся очень высокие горы, образующие большую цепь, идущую с севера на юг. Эта горная цепь имеет наиболее крутые склоны, что является основным фактором эрозии и затопления участков речных бассейнов.

Восточный регион также состоит из горного массива значительной высоты. Как показали различные исследования, проведенные для определения структуры берингийского рельефа, Бурунди является страной с наличием нескольких гор, что делает понятным тот факт, что значительная ее часть может легко подвергаться эрозии и затоплению.

Анализ пространственного распределения температурных данных и данных об осадках позволяет выяснить, в каких регионах выпадает большое количество осадков по сравнению с другими частями страны. Так, большое количество осадков наблюдается на западе страны. Исходя из данных анализа рельефа, установлено, что западный регион должен быть гораздо более подвержен наводнениям и водной эрозии, чем другие регионы, поскольку сочетание большого количества осадков и пересеченной местности приводит к высокой скорости течения воды в дождевой период, вызывая впоследствии эрозию и переполнение водосборных бассейнов.

Распределение температурных данных показало, что высокие температуры отмечены на северо-востоке страны и в некоторых населенных пунктах на западном побережье Бурунди. Северо-восток Бурунди в гораздо большей степени подвержен риску сельскохозяйственной засухи, поскольку в этом регионе наблюдаются высокие температуры и низкое количество осадков по сравнению с остальной территорией страны.

Графики суточного количества осадков и суточной температуры показывают, что в Бурунди есть два сезона с большим количеством осадков и

один сезон, когда осадков практически нет. Сезоны с высоким количеством осадков наступают с сентября по январь и с февраля по май. В этот период важно обратить внимание на риски, связанные с обильными осадками практически во всех регионах страны, особенно на западный регион, где наблюдается пересеченная местность и высокий средний уровень осадков.

Согласно тем же графикам, сухой сезон длится с июня по август и характеризуется несколько более высокими температурами, чем в остальное время года. В сухой сезон для большинства растений наступает сельскохозяйственная засуха.

Следует отметить, что ежедневные осадки выпадают нерегулярно и не с одинаковой интенсивностью, что вносит неопределенность в управление рисками. Таким образом, значительная часть сельскохозяйственной деятельности может оказаться в колоссальном убытке, что приведет к ухудшению экономической обстановки в стране.

Очевидно, что для управления рисками, связанными с временным изменением количества осадков, необходимо прогнозировать риски, связанные с наводнениями и эрозией, с целью принятия защитных мер.

Статистический анализ позволил установить наличие определенной стационарности в данных о температуре и количестве осадков. Это позволяет построить параметрическую модель, которая может быть использована для прогнозирования рисков. С точки зрения автокорреляции примечательно, что температурные данные имеют сильный коэффициент автокорреляции вплоть до интервала 25. Это означает, что прогноз температурного риска оправдается вплоть до 20 дня.

Автокорреляция данных по осадкам, напротив, не является сильной после отклонения от 6 до 8, что означает, что прогноз рисков по осадкам должен проводиться как можно чаще для повышения достоверности краткосрочного прогноза.

Анализ корреляции между температурой и осадками показал, что между осадками и температурой существует слабая связь, то есть повышение

температуры недостаточно сильно влияет на изменение количества осадков. Следует также отметить, что анализ корреляции выявил отрицательный характер, что объясняет, почему температурный режим развивается в направлении, противоположном режиму осадков.

## **Глава 4. Модель геоинформационной системы управления гидрометеорологическими рисками в республике Бурунди**

Исполнение этой модели основано на методе управления рисками, представленном в работах [25, 29].

### **4.1. Основные компоненты модели геоинформационной системы управления гидрометеорологическими рисками в республике Бурунди**

Данная модель основана на методе управления гидрометеорологическими рисками, представленном в работах [25, 29]. Используя методы, представленные в предыдущем разделе, базу данных, работающую на языке программирования SQL, и язык программирования Python, была разработана модель, способная прогнозировать риски и предоставлять основные показатели, необходимые для принятия решений. Согласно упомянутому выше методу управления рисками, в нем учитываются основные статистические характеристики, такие как коэффициент автокорреляции, среднее значение, среднеквадратическое отклонение и текущее значение того или иного параметра [9, 21].

Данная модель представлена на рис. 4.1. и состоит из следующих блоков:

1. *База данных.* Этот блок используется для хранения основных данных (температура, количество осадков), на основе которых планируется обработка. Также здесь сохраняются результат оценки риска, который отображается на карте [21, 66].

2. *Блок обработки данных.* Рассчитываются статистические характеристики (матожидание, среднее значение, среднеквадратическое отклонение, коэффициент автокорреляции и критерий Стьюдента) случайного процесса с помощью программного обеспечения, разработанного на языке программирования Python [24].

3. *Блок принятия решения.* На основании статистических и реальных данных принимается решение о дальнейшем проведении расчетов. Решение принимается на основании принятия или отвержения гипотезы о соответствии



реальных и статистических данных одной генеральной совокупности данных [22, 24].

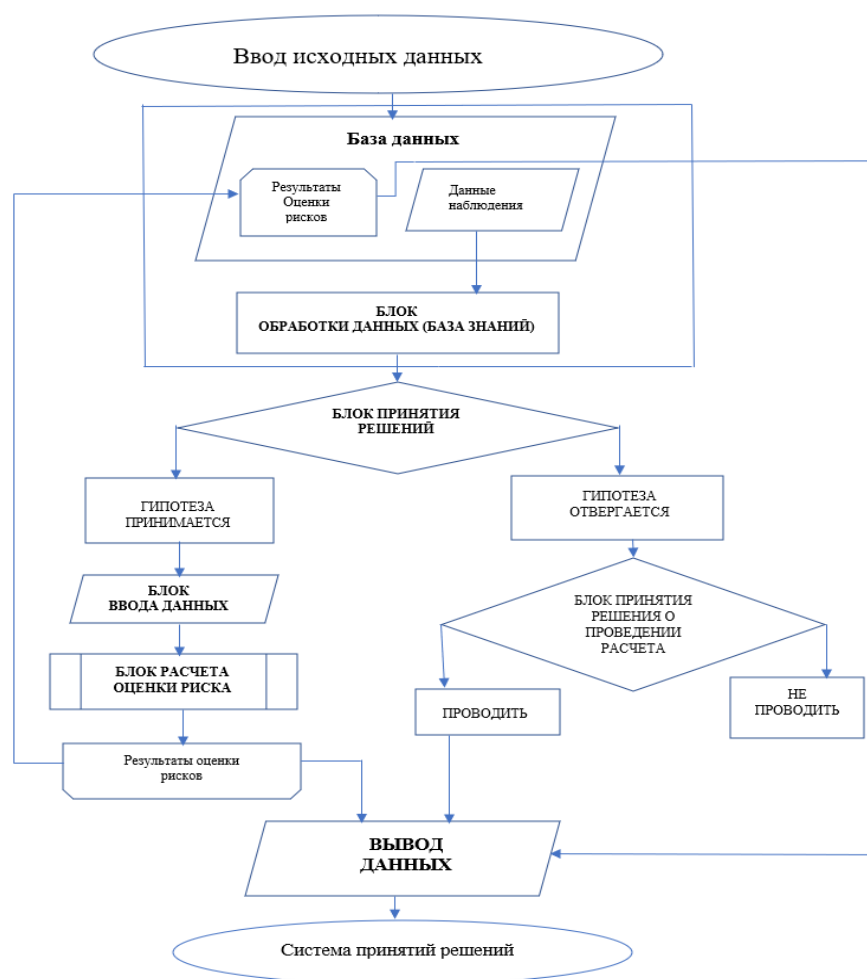


Рис. 4.1. Блок-схема алгоритма реализации геоинформационной модели оценки гидрометеорологических рисков сельского хозяйства.

4. *Блок ввода.* В этот блок вводятся статистические характеристики, необходимые для работы данной модели, такие как коэффициент автокорреляции, среднее значение, среднее среднеквадратичное отклонение, а также текущее значение данного параметра. В этом же блоке указываются значения относительно верхнего и нижнего уровней параметра. В конце задается время прогнозирования (глубина прогноза) [24, 40].

5. *Блок расчета оценки риска.* По статистическим характеристикам, полученным в блоке обработки данных, производится расчет оценки рисков по следующим формулам 2.11, 2.5 и 2.12.

6. *Блок вывода данных.* Блок вывода данных используется для отображения значения риска. После ввода статистических характеристик, необходимых для данной модели, модель рассчитает коэффициенты рисков, и отображает значение [50, 67].

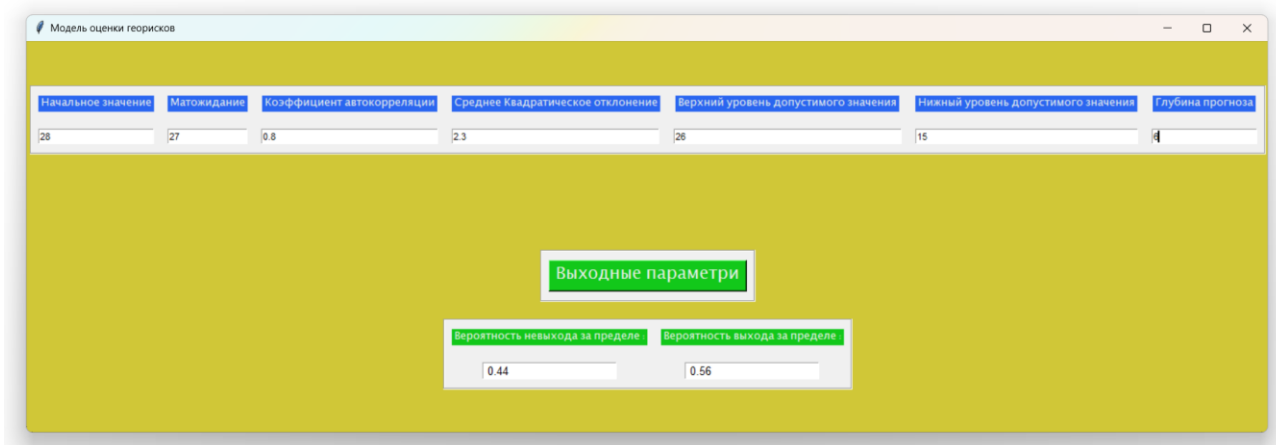


Рис.4.2. Графический интерфейс пользователя модели геоинформационной системы управления гидрометеорологическими рисками.

В соответствии со схемой геоинформационной модели оценки рисков сельского хозяйства, были созданы базы данных, которые привязаны к конкретным географическим координатами. Основные параметры, которые сохраняются в базах данных, являются следующими: данные по осадкам, данные по температурам, среднее значение температуры, название станции, среднеквадратическое отклонение, дисперсия, коэффициент риска, коэффициент ущерба [50].

Gitega	Kirundo	Muyinga	Ngozi	Makamba	Rutana	Ruyigi	Cankuzo	Karusi
double precision	double precision	double precision	double precision	double precision	double precision	double precision	double precision	double precision
24.93989	28.046792	23.5747	27.7759	26.1397	27.786494	26.786494	27.286494	29.694
24.88212	28.034536	23.6318	27.782	26.1438	27.755152	26.755152	27.255152	29.700
24.82763	28.024184	23.6883	27.7883	26.1483	27.725938	26.725938	27.225938	29.706
24.77636	28.015688	23.7442	27.7948	26.1532	27.698816	26.698816	27.198816	29.712
24.72825	28.009	23.7995	27.8015	26.1585	27.67375	26.67375	27.17375	29.718
24.68324	28.004072	23.8542	27.8084	26.1642	27.650704	26.650704	27.150704	29.724
24.64127	28.000856	23.9083	27.8155	26.1703	27.629642	26.629642	27.129642	29.730
24.60228	27.999304	23.9618	27.8228	26.1768	27.610528	26.610528	27.110528	29.736
24.56621	27.999368	24.0147	27.8303	26.1837	27.593326	26.593326	27.093326	29.742
24.533	28.001	24.067	27.838	26.191	27.578	26.578	27.078	29.748
24.50259	28.004152	24.1187	27.8459	26.1987	27.564514	26.564514	27.064514	29.754
24.47492	28.008776	24.1698	27.854	26.2068	27.552832	26.552832	27.052832	29.760
24.44993	28.014824	24.2203	27.8623	26.2153	27.542918	26.542918	27.042918	29.766
24.42756	28.022248	24.2702	27.8708	26.2242	27.534736	26.534736	27.034736	29.772
24.40775	28.031	24.3195	27.8795	26.2335	27.52825	26.52825	27.02825	29.778
24.39044	28.041032	24.3682	27.8884	26.2432	27.523424	26.523424	27.023424	29.784
24.37557	28.052296	24.4163	27.8975	26.2533	27.520222	26.520222	27.020222	29.790
24.36308	28.064744	24.4638	27.9068	26.2638	27.518608	26.518608	27.018608	29.796
24.35291	28.078328	24.5107	27.9163	26.2747	27.518546	26.518546	27.018546	29.802
24.345	28.093	24.557	27.926	26.286	27.52	26.52	27.02	29.808
24.33929	28.108712	24.6027	27.9359	26.2977	27.522934	26.522934	27.022934	29.814
24.33572	28.125416	24.6478	27.946	26.3098	27.527312	26.527312	27.027312	29.820
24.33423	28.143064	24.6923	27.9563	26.3223	27.533098	26.533098	27.033098	29.826

Рис. 4.3. Табличное представление характеристик регионов Бурунди в геоинформационной системе..

После обработки данных полученные результаты автоматически сохраняются в базе данных.

Благодаря расширению PostGis, установленному в базе данных, исходные данные и полученные результаты могут быть представлены на пространственной карте непосредственно в базе данных (рис 4.4), и это дает возможность увидеть различные характеристики, встречающиеся в разных местностях [58].

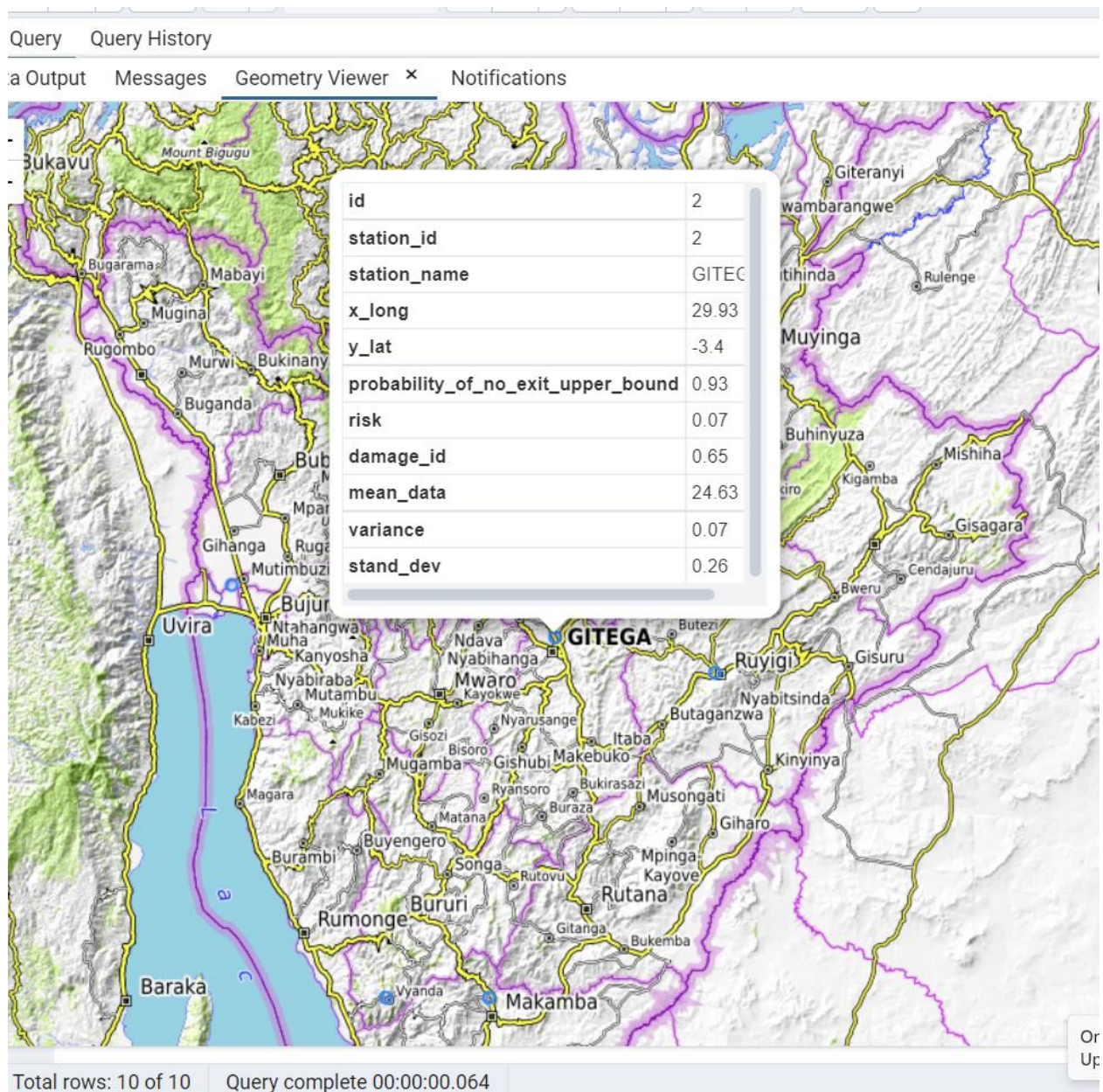


Рис. 4.4. Картографическое представление характеристик регионов Бурунди в геоинформационной системе.

На карте (рис 4.4), созданной непосредственно на основе базы данных, можно увидеть различные значения статистических характеристик, а также значения риска, связанные с температурой воздуха в указанной точке [80].

При нажатии на точку, отмеченную на карте, можно сразу выводить информацию о различных данных, соответствующих характеристикам этого места, как это показано на карте в базе данных (рис 4.4). Как уже упоминалось, каждая точка содержит идентификатор (id) каждого столбца, идентификатор каждой станции (station\_id), название станции (station\_name), долготу (x\_long),

широту ( $y_{lat}$ ), вероятность невыхода из заданного предела ( $probability\_of\_no\_exit\_upper\_bound$ ), коэффициент риска ( $risk$ ), коэффициент ущерба ( $damage\_id$ ), среднее значение, дисперсию ( $variance$ ) и среднеквадратическое отклонение ( $stand\_dev$ ).

Коэффициент риска представляет собой вероятность того, что случайный процесс выходит за заданный предел при условии, что значение этого процесса в начальный момент времени известно, и он обратно пропорционален вероятности того, что процесс не выходит за заданный предел.

Кроме того, можно встретить определения, в которых риск трактуется как отклонение от желаемого результата, непредсказуемость результатов или просто возможность потерь. Однако во всех этих определениях внимание обращается только на то, что риск, так или иначе связан с какими-либо неблагоприятными исходами альтернатив, потерями, угрозами, опасностями и т.п. Также следует отметить, что риск – это, прежде всего, характеристика неопределенности. Дело в том, что и в условиях определенности возможны неблагоприятные исходы, но поскольку они предопределены и неизбежны, то риск в таких «заведомо проигрышных» ситуациях отсутствует. Стоит обратить внимание на то, что термин риск современные исследователи наиболее часто отождествляют с опасностью. Другая четкая тенденция состоит в том, что риск связывается с вероятностью возможного ущерба или развития события в нежелательном направлении.

В сельскохозяйственном секторе, особенно в Бурунди, риск напрямую связан со случайными колебаниями суточной температуры и количества осадков. Несмотря на то, что климатические условия для развития той или иной культуры (растения) известны заранее, как и данные о средней температуре и количестве осадков для различных регионов, следует отметить, что эти параметры имеют динамические изменения, и их колебания могут сопровождаться огромными потерями. С этой точки зрения крайне необходимо прогнозировать риск превышения значения, за которым можно ожидать

опасности и, соответственно, ограничивать возможность ущерба в сельскохозяйственном секторе [92].

Коэффициент ущерба, в свою очередь, является показателем, характеризующим возможные сельскохозяйственные потери в зависимости от заданного уровня риска. Коэффициент риска прямо пропорционален коэффициенту ущерба.

Согласно уже проведенным исследованиям [92], повышение температуры может привести к ускорению периода созревания. Однако несмотря на то, что повышение температуры может ускорить процесс созревания, следует помнить, что это повышение может иметь негативные последствия для урожайности сельскохозяйственных культур. При превышении пороговых значений температуры урожайность может снизиться, поскольку ускорение процесса созревания сопровождается снижением производства зерна. Кроме того, повышение температуры влияет на способность растений удерживать и использовать влагу. Испарение из почвы ускоряется, а листья растений теряют больше влаги [92].

Учитывая прогнозируемые показатели риска, в случае высокого уровня риска следует применять методы повышения влажности почвы. Чтобы избежать воздействия высоких температур, можно с помощью водяных насосов перекачивать воду из водных источников, таких как реки, озера и грунтовые воды, к необходимому сельскохозяйственному полю, а также использовать системы полива и ирригации. В зависимости от степени риска фермер может выбрать подходящий ритм полива или откачки воды, чтобы повысить урожайность и соответственно минимизировать потери (ущерб) в процессе сельскохозяйственной деятельности.

Обильные осадки за короткий промежуток времени трудно поглотить почве, если только она не богата корнями и гумусом. Если почвы богаты корнями и гумусом, они могут поглощать большее количество воды и предотвращать потерю питательных веществ на поверхности. Там, где существует высокий риск выпадения обильных осадков, повышение

устойчивости почвенных агрегатов и инфильтрации воды за счет значительного растительного покрова является актуальным решением для рационального управления водными ресурсами и адаптации сельскохозяйственной практики к кратковременному увеличению количества осадков [106].

В зависимости от интенсивности прогнозируемого индекса риска геоинформационная модель оценки рисков сельского хозяйства позволяет фермеру или любому другому лицу принимать решения, связанные с замедлением (минимизацией) эрозии или наводнения всеми возможными средствами, которые необходимо предпринять для срочной защиты сельскохозяйственной деятельности. Термин «замедление» используется потому, что потоки задерживаются и, следовательно, уменьшаются. Наводнения можно замедлить с помощью предупредительных мер инженерно-технического характера. Они базируются в основном на типовых способах снижения последствий наводнений. К ним могут быть отнесены: уменьшение максимального расхода в реке путем перераспределения стока во времени, сооружение ограждающих дамб (валов), спрямление русла рек, подсыпка территорий, берегоукрепительные и дноукрепительные работы, регулирование стока паводка (половодья) с помощью водохранилищ, применение комбинированного способа профилактики наводнений [106].

#### **4.2. Геоинформационное веб-приложение**

Согласно результатам, полученным в ходе проведения анализа данных, прогнозирование рисков, связанных с температурой, возможно на период (глубина прогноза) от 6 до 10 дней, в свою очередь прогнозы рисков, связанных с осадками, остаются достоверными на период не более 6 дней для большинства регионов, исследованных в рамках данной работы.

Для облегчения принятия решений было создано веб-приложение, отображающее изменение риска по всей территории Бурунди. Это приложение позволяет выбрать уровень, за которым необходимо проанализировать риск, связанный с тем или иным параметром. Поскольку в данной работе риск связан

с температурой, приложение может быть использовано для выбора уровня температуры, при превышении которого температура может оказать негативное влияние на определенные виды сельскохозяйственной деятельности.

В зависимости от колебаний суточной температуры растения переносят ее по-разному. В данном случае были взяты разные температурные уровни, в соответствии с которыми можно визуализировать риски в виде цветовых индикаторов. Для интерпретации карты важно отметить, что чем интенсивнее цвет региона, тем выше уровень риска [31, 85].

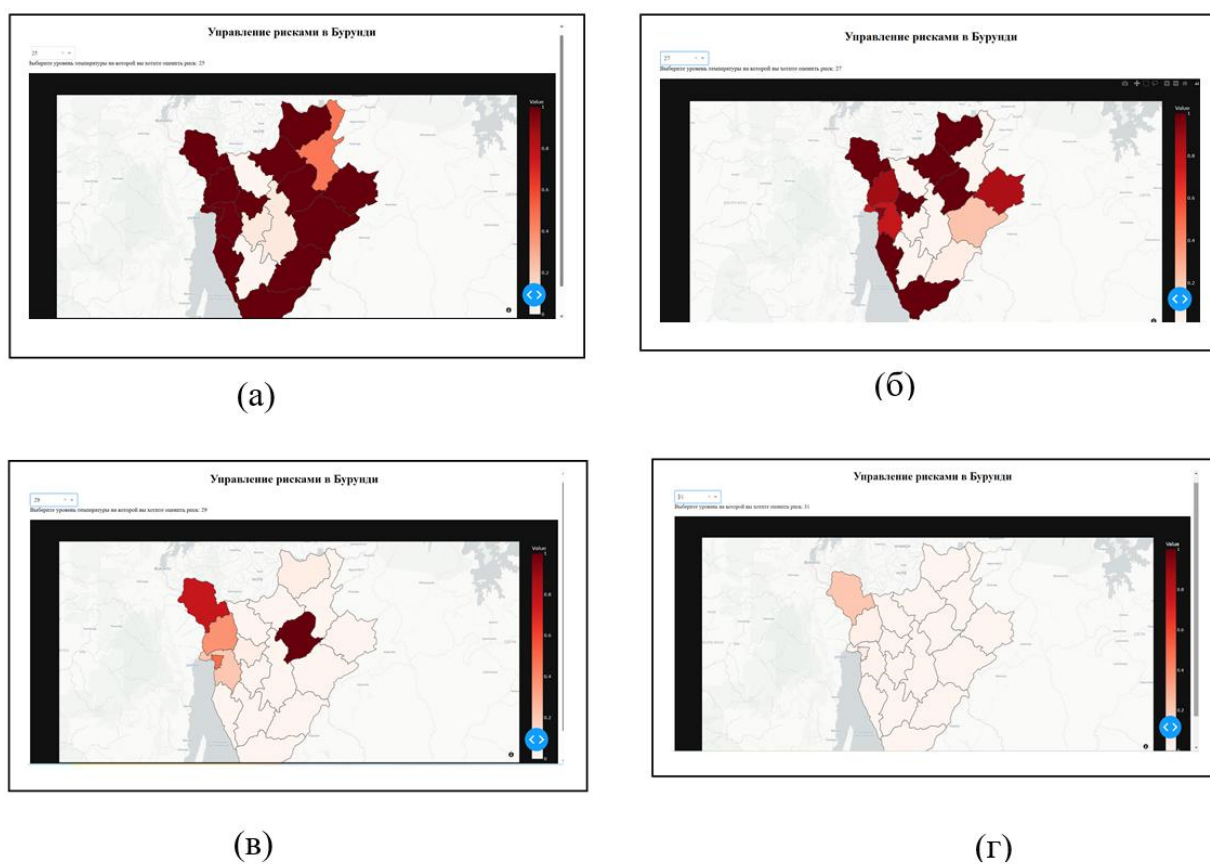


Рис. 4.5. Геоинформационная карта, иллюстрирующая риск:

- а) связанный с температурой выше 25 °С; б) связанный с температурой выше 27 °С;
- в) связанный с температурой выше 29 °С; г) связанный с температурой выше 31 °С (г)

Как видно на рис. 4.5, вверху слева имеется поле, в котором можно выбрать уровень температуры, при превышении которого наблюдается риск повышения уровня температуры.



Если взять за основу риск, связанный с температурой выше 25 °С, то можно увидеть, что значительная часть территории Бурунди станет непригодной для растений, не выдерживающих температуру выше 25 °С. Только провинции центрального региона будут защищены.

Чем темнее цвет, тем выше риск, то есть температура значительно превышает установленный порог. В целях снижения влияния этого риска можно применить различные методы, упомянутые выше, например, увеличить частоту полива, осуществлять искусственное увлажнение и другие срочные методы, которые считаются эффективными для снижения ущерба.

Настоящая система визуализации позволяет представить риски на разных пороговых уровнях, предлагая возможность самостоятельного выбора уровня, выше которого планируется проанализировать пространственное распределение уровня риска. Учитывая стадию развития растения (прорастание семян, развитие сеянца, рост от сеянца до взрослого растения), модель позволяет визуализировать показатель риска в соответствии с желаемым уровнем, обеспечивая хорошее представление о принятии необходимых мер для минимизации потерь и увеличения урожая.

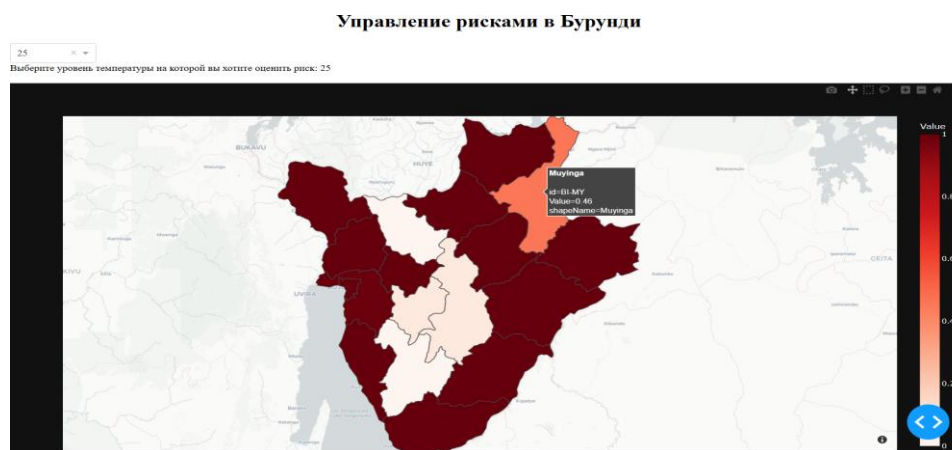


Рис. 4.6. Геоинформационная карта, иллюстрирующая риск, связанный с температурой выше 25 °С.

Как видно из рис. 4.6, настоящая карта является интерактивной и позволяет увидеть точное значение риска для любого заданного

местоположения. При этом можно увидеть не только фактическое значение риска, но и другие дополнительные сведения, доступные для данного места, включая название и идентификатор (ID) данного места.

Помимо вышеперечисленного, данное веб-приложение обладает рядом функций, в том числе возможностью выделить часть территории и корректно отобразить ее с целью определения наличия или отсутствия высокой степени риска [40, 84].



Рис. 4.7. Иллюстрация риска в выбранном регионе на севере страны.

Как показано на рис. 4.7, выбрав северную часть, можно увидеть три провинции и их степень риска. В данном случае провинции Нгози и Кирундо имеют уровень риска равен 1. Это означает, что прогнозируемые суточные колебания температуры будут значительно выше порога нормальной температуры для заданной эталонной культуры. В этом случае необходимо принять экстренные меры по поддержанию влажности почвы, например, полив или увеличение нормы полива, чтобы стимулировать нормальное развитие соответствующих культур [45, 92, 106].

Данная модель может быть использована не только для определения рисков, связанных с повышением температуры, но и с другими параметрами. В рамках данной работы были также проведены исследования рисков, связанных с осадками. Например, в Бурунди в феврале 2014 г. сильные дожди вызвали сильное наводнение. В качестве примера были рассчитаны риски по всей

стране, используя данные об осадках, для определения регионов, наиболее подверженные риску наводнения [45, 89, 95].

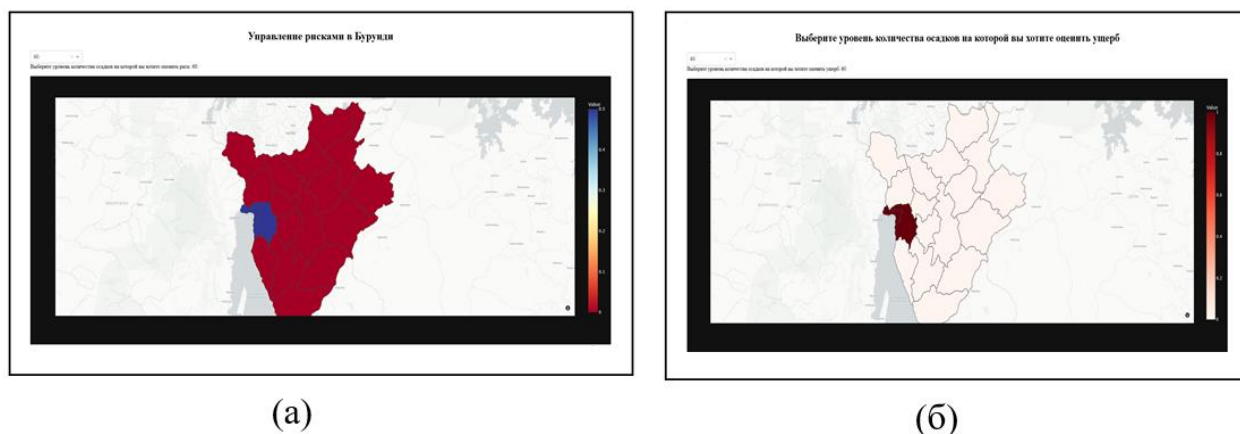
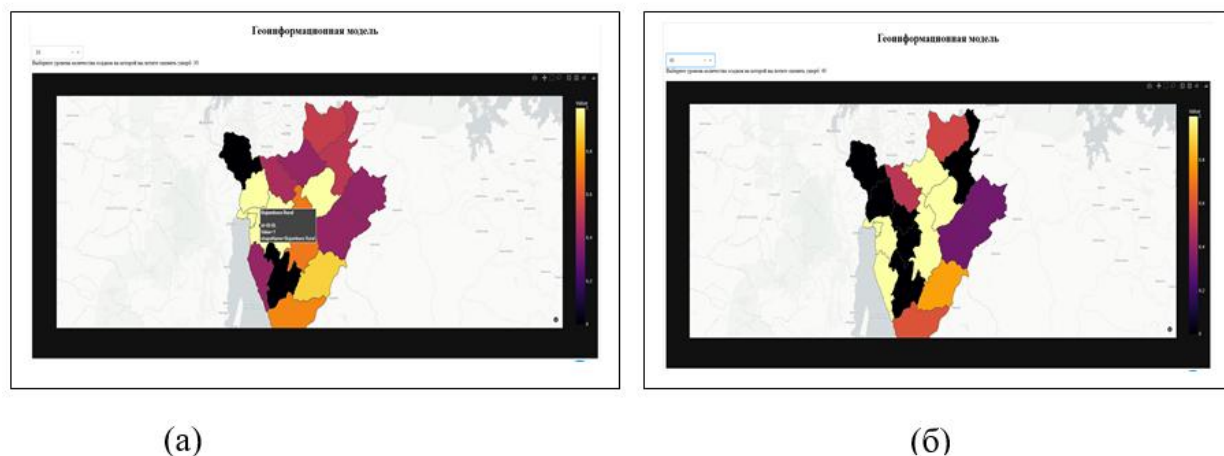
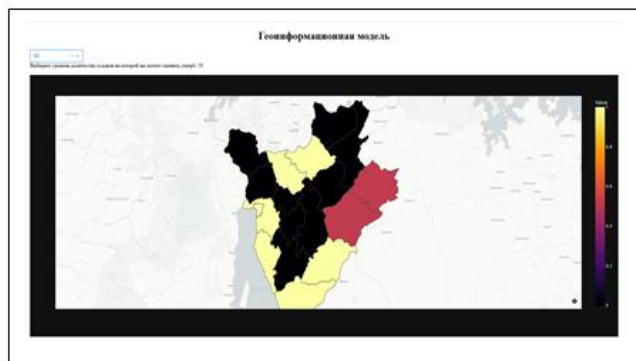


Рис. 4.8. Геоинформационная карта, иллюстрирующая риск, связанный с осадками выше 60 мм в периоде с 1 по 10 февраля 2014 г. (а); геоинформационная карта, иллюстрирующая пространственные изменения индикатора ущерба в результате выпадения осадков выше 60 мм в периоде с 1 по 10 февраля 2014 г. (б).

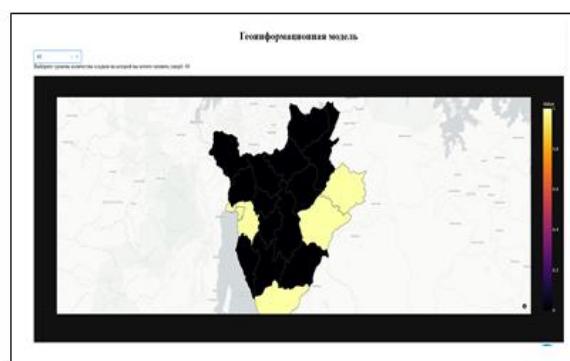
Как показано на рис. 4.8.а, в период с 1 по 10 февраля по индикатору риска видно, что район, наиболее подверженный стихийным бедствиям, связанным с обильными осадками, находится на западе страны, в провинции Бужумбура [40, 89].

При сравнении рис. 4.8.а и рис. 4.8. б видно, что коэффициент риска прямо пропорционален коэффициенту ущерба. Это означает, что чем выше риск, тем выше вероятность понести большой ущерб в сельскохозяйственном секторе.





(В)



(Г)

Рис. 4.9. Пространственное распределение индикатора ущерба в марте 2013 г. с учетом суточного количества осадков, а) превышающего 30мм; б) превышающего 40мм; в) превышающего 50мм; г) превышающего 60мм.

Для объективного понимания результатов, полученных с помощью этой модели, важно учитывать не только показатель риска, но и показатель ущерба.

По результатам, представленным на рис. 4.9, видно, какие регионы наиболее подвержены ущербу. В зависимости от физического аспекта (индекса экспозиций склонов, рельефа местности, индекса пересеченности рельефа и индекса топографического положения рельефа) исследуемой территории и с учетом условий, необходимых для развития рассматриваемого растения, можно принять необходимые меры предосторожности для ограничения потерь.

Таким образом, на основе этой модели становится ясно, что можно заранее принять меры для предотвращения неблагоприятных последствий ливневых дождей с помощью активных методов предотвращения наводнений и эрозии, таких как регулирование стока в русле рек, отвод паводковых вод, регулирование поверхностного стока на водосборах, гидротехнические сооружения, устройство агрогидромелиоративных почвозащитных комплексов, и т.д.

### 4.3. Оценка эффективности модели

Для оценки качества прогнозов использовались результаты моделирования. Для этого применялась процедура, предложенная в работе Джаннароса (Giannaros) [47].

В соответствии с данным методом, для верификации эффективности модели в данной работе рассчитаны статистические критерии, которые дают общее представление о качестве прогноза вероятности невыхода из заданных пределов. Рассчитанные статистические характеристики являются следующими:

- относительная ошибка ( $RE$ );
- средняя абсолютная ошибка ( $MAE$ );
- систематическая ошибка ( $ME$ );
- средняя квадратичная ошибка ( $RMSE$ );
- коэффициенты корреляции Пирсона ( $CORR_{P,F}$ ) между прогностическими и фактическими результатами.

$$RE = \sum_i^n \frac{P_i - F_i}{F_i} \times 100 \quad (4.1)$$

$$ME = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - F_i}{F_i} \quad (4.2)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n |P_i - F_i| \quad (4.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - F_i)^2} \quad (4.4)$$

$$CORR_{P,F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{P_i - \mu_P}{\sigma_P} \times \frac{F_i - \mu_F}{\sigma_F} \quad (4.5),$$

где  $P_i$  – прогнозируемая вероятность невыхода из заданного предела,

$F_i$  – фактическая вероятность невыхода из заданного предела.

Значения относительной и систематической ошибок позволяют оценить точность моделирования с точки зрения завышения или занижения вероятности невыхода из заданных пределов, а среднеквадратическая и средняя абсолютная

ошибка дают информацию о качестве прогноза по всей исследуемой области. Коэффициенты корреляции Пирсона (CORR) между прогностическими и фактическими результатами дают информацию о линейной связи между прогностическими и фактическими результатами вероятностей невыхода из заданных пределов температуры [47, 95].

Для оценки эффективности модели был сделан прогноз вероятности того, что температура не превысит установленные уровни температуры ( $B_1 = 25; B_2 = 27; B_3 = 29; B_4 = 31$ ). Это было сделано на основе данных, собранных с десяти метеорологических станций в Бурунди, а оценка – на основе статистических характеристик, которые позволяют оценить точность эффективности по отношению к фактическим данным.

Таб. 4.1

Статистические Характеристики	Значение
<i>ME</i>	0.0000051
<i>MAE</i>	0.0000051
<i>RMSE</i>	$4.434 \times 10^{-6}$
<i>RE</i>	0
<i>CORR<sub>p,f</sub></i>	1

Таб. 4.3

Статистические Характеристики	Значение
<i>ME</i>	-0.00878
<i>MAE</i>	0.00878
<i>RMSE</i>	$13.07 \times 10^{-3}$
<i>RE</i>	0
<i>CORR<sub>p,f</sub></i>	0.99

Таб.4.2

Статистические Характеристики	Значение
<i>ME</i>	-0.01595
<i>MAE</i>	0.01595
<i>RMSE</i>	0.011151
<i>RE</i>	0
<i>CORR<sub>p,f</sub></i>	0.99997

Таб. 4.4

Статистические Характеристики	Значение
<i>ME</i>	0.018293
<i>MAE</i>	0.018293
<i>RMSE</i>	$19.98 \times 10^{-3}$
<i>RE</i>	0
<i>CORR<sub>p,f</sub></i>	0,9867

По результатам анализа, представленным в таб. 4.1, таб. 4.2, таб. 4.3, таб. 4.4, соответствующих соответственно результатам анализа по уровням температуры ( $B_1 = 25; B_2 = 27; B_3 = 29; B_4 = 31$ ), можно отметить, что модель идеально подходит для прогнозирования рисков, связанных с температурой, поскольку видно, что относительная ошибка равна нулю в четырех случаях, более того, корреляция между результатами прогноза и реальными результатами намного выше 0,95, что показывает, что модель обеспечивает наиболее надежные результаты. Кроме того, систематическая ошибка не превышает 2 %, что доказывает, что модели можно доверять при принятии решений о том, какой тип растений сажать в зависимости от меняющихся погодных условий [47, 95].

При расчете рисков, связанных с осадками, полученные результаты показывают, что модель способна определять риски с высокой степенью достоверности, однако в некоторых случаях наблюдается корреляция между величиной риска, рассчитанной вручную на основе реальных данных, и риском, полученным с помощью модели, которая может иметь значения от 0,6 до 0,8. Это закономерно, поскольку суточные осадки подвержены значительным колебаниям, а значит, модель не может дать абсолютно точных результатов.

#### **4.4. Рекомендации по применению геоинформационной модели для управления рисками в сельскохозяйственном секторе в качестве инструмента принятия решений и обработки полученных результатов**

Для правильного ведения сельскохозяйственной деятельности необходимо заранее иметь представление о прогнозе показателей риска и ущерба в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективах в зависимости от потребностей лиц, принимающих решения. Также очень важно знать пространственное распределение показателей риска и ущерба, чтобы фермеры могли принимать рациональные решения, исходя из географического положения своих сельскохозяйственных районов. Показатели риска и ущерба рассчитываются и прогнозируются с использованием статистических характеристик (среднее значение, коэффициент автокорреляции,

среднеквадратичное отклонение, пороговое значение и текущее значение данного параметра) рассматриваемых параметров (ежедневные данные об осадках, ежедневная температура и т.д.).

В зависимости от типа требуемого прогноза необходимо учитывать тип дискретизации исходных данных, которые будут использоваться для прогноза.

– Для краткосрочных прогнозов (от одного дня до трех дней) рекомендуется использовать суточное значение рассматриваемого параметра.

– Для среднесрочных прогнозов (от трех до десяти дней) рекомендуется использовать суточное значение рассматриваемого параметра.

– Для долгосрочных прогнозов рекомендуется использовать среднемесячное значение рассматриваемого параметра.

Результаты прогнозирования для оперативного применения можно считать вполне удовлетворительными, так как результаты верификации для этой модели показывают, что полученные результаты соответствуют действительности с погрешностью менее 5 %.

Методика определения вероятности наступления опасного события, основанная на инновационной математической модели, разработанной для расчета показателя риска опасного события при известных исходных геопространственных данных, может быть полезна для лиц, принимающих решения в процессе управления динамическими параметрами, колебания которых могут стать источником ущерба для сельскохозяйственных культур. Для оценки вероятности наступления показателя риска пользователь проводит вероятностное моделирование с целью определения вероятности выхода за пределы установленного уровня (порогового значения), колебания за которым могут привести к ущербу для сельского хозяйства.

Результаты представлены в файле, который можно открыть в Excel, и расположены в столбцах в соответствии с их характером. Существует различие между столбцами, содержащими данные о вероятности наступления риска, коэффициенте ущерба, вероятности непревышения порогового значения, а также географические названия и географические координаты данных.



Географические координаты и географические названия определяются пользователем заранее, чтобы облегчить автоматическое отображение данных на интерактивной карте.

Оценка проводилась на основе метеорологических данных, полученных в различных сельскохозяйственных регионах Бурунди. В качестве используемых данных были приняты следующие гидрометеорологические параметры – среднесуточная температура и суточное количество осадков. Использовались данные, собранные для каждого дня с января 2010 г. по декабрь 2018 г. включительно с интервалом в 24 ч. На основе этих данных были рассчитаны и спрогнозированы показатели риска и ущерба.

Апробация разработанной модели и методологии управления рисками в сельскохозяйственном секторе показала, что при соблюдении основных условий модели можно получить качественные прогнозы показателей риска.

## Выводы по главе 4

В данной главе разработана геоинформационная модель оценки рисков в результате внедрения параметрической модели в геоинформационную систему. Используя язык программирования Python, был разработан графический интерфейс, удобный для пользователей. Были описаны различные компоненты этой модели, включая возможность хранения информации (данных, необходимых для прогнозирования рисков или результатов прогнозирования рисков) в базе данных. Результаты, полученные с помощью этой модели, представлены на интерактивной карте.

Следует отметить также, что данная модель подходит для определения риска, связанного не только с температурой или с количеством осадков, но и с другими природными явлениями, которые могут помешать сельскохозяйственной деятельности в Бурунди и в других странах. Поскольку эта модель работает непосредственно с данными в базе данных, полученные результаты сохраняются также в базе данных. Это облегчает обновление веб-приложения, на котором представлена интерактивная карта, и обновление карты позволяет пользователю в реальном времени видеть изменение риска по всей стране.

Важно отметить, что использование данной модели позволит заранее определить регионы, наиболее подверженные георискам. Определение регионов, подверженных риску, позволит принимать решения по минимизации потерь, что, в свою очередь, способствует развитию экономической системы и адаптации сельскохозяйственного сектора к изменению климата.

В данной главе представлены также результаты, полученные с помощью данной модели, включающие индекс риска и коэффициент ущерба. Ссылаясь на методы верификации, представленные в этой же главе, можно сделать вывод, что данная модель характеризуется высокой операционной эффективностью, что может облегчить управление рисками, связанными с сельскохозяйственным сектором.

Следует подчеркнуть, что сельскохозяйственное выращивание зависит и от многих других факторов, таких как количество осадков, содержание минеральных солей в почве, продолжительность осадков, эрозия и т.д. Необходимо учитывать все эти факторы, которые играют большую роль в обеспечении правильного ведения сельскохозяйственного производства с целью получения хорошего урожая. Для более точного принятия решений необходимо сравнивать показатели риска и ущерба.

## Заключение

В ходе проведенного исследования автором были получены следующие результаты:

1. Проведен анализ геоэкономической обстановки в Республике Бурунди. Экономическая обстановка, в которой находится Бурунди в последнее время, требует совершенствования методов работы в сочетании с эффективным управлением рисками для увеличения сельскохозяйственного производства, которое является основным источником экономики Бурунди.

2. В ходе исследования было отмечено, что осадки и температура остаются основными причинами рисков, угрожающих сельскохозяйственной деятельности в Бурунди, среди которых можно выделить наводнения, эрозию и засуху.

3. В результате анализа различных методов было отмечено, что предложенные методы в различных национальных планах по управлению рисками, связанными с чрезвычайными климатическими ситуациями, носят теоретический характер и не представляют конкретных научных методов контроля рисков из-за нехватки квалифицированных кадров в области управления рисками с использованием современных научных методик.

4. В ходе анализа на основе географических информационных систем удалось установить геофизические факторы Бурунди, которые определяют ее подверженность различным климатическим угрозам. Используя анализ спутниковых снимков физического ландшафта Бурунди, удалось рассчитать такие индексы, как индекс пересеченности, индекс топографического положения рельефа, индекс экспозиции склонов и высоту возвышенности Бурунди. Эти индексы позволили сделать вывод о том, что геофизические характеристики Бурунди благоприятствуют возникновению наводнений, эрозии и засухи на значительной части территории страны. Согласно индексам Бурунди имеет очень гористый рельеф, который способствует усилению рисков, связанных с ливневыми дождями.

5. Проведен общий обзор значимости использования геоинформатики в управлении рисками. Были проанализированы основные свойства географических информационных систем и их применение в различных секторах. Также проведен общий обзор использования географических информационных систем в различных секторах.

6. Автор провел широкий анализ работы отечественных и зарубежных ученых и организаций в области математического моделирования и оценки рисков на основе использования априорных географических данных. Был выявлен ряд проблем и нерешенных вопросов, которые были учтены в данной диссертации.

7. Разработана модель оценки рисков для сельскохозяйственного сектора. Она позволяет управлять рисками, связанными с сельскохозяйственным сектором, в зависимости от текущих значений параметров. Модель предполагает возможность использования постоянно обновляемых статистических данных.

8. Разработана информационная система обработки географических данных для оценки рисков. Эта модель используется для прогнозирования показателя риска и коэффициента ущерба.

9. Анализ результатов, полученных с помощью этой модели, показал ее высокую эффективность и высокую значимость с точки зрения принятия решений по минимизации или снижению рисков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллин Р. К. Шихов А. Н. Синтетическое картографирование опасных метеорологических явлений на региональном уровне / Р. К. Абдуллин, А. Н. Шихов // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78. – № 7. – С. 31–40. –DOI: 10.22389/0016-7126-2017-925-7-00-00.
2. Авакян, А. Природные и антропогенные причины наводнений. / А. Авакян // Основы безопасности жизнедеятельности. – 2001. – № 9. – С. 22–27.
3. Ананьев Ю. С. Геоинформационные системы. Учеб. пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. – 70 с.
4. Ананьев Ю. С. ГИС и принципы ее работы / Ю. С. Ананьев. – Томск: изд-во, 2003. [Электронный ресурс]. – URL: <https://kpfu.ru/portal/docs/F1685823411/GIS.pdf>. [Дата обращения: 16.11.2022].
5. Аргучинцева, А. В. Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических наблюдений: учеб. пособие / А.В. Аргучинцева. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 2007. – 105 с.
6. Ашимов, А. А. Элементы теории и методы параметрического регулирования эволюции национальной экономики на базе стохастических дискретных динамических моделей / А. А. Ашимов, А. С. Ашимов, Ю. В. Боровский и др. // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 7. – С. 55–66.
7. Борздова, Т. В. Основы статистического анализа и обработка данных с применением Microsoft Excel / Т. В. Борздова. – Минск : ГИУСТ БГУ, 2011. [Электронный ресурс]. – URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/93367> [Дата обращения: 9.01.2024].
8. Боронина Л. Н. Основы управления проектами. Учебное пособие / Л. Н. Боронина, З. В. Сенук – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2016. – 134 с. – ISBN 978-5-7996-1751-6.
9. Буйначев, С. К. Основы программирования на языке Python / С. К. Буйначев, Н. Ю. Боклаг. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. – 89 с. – ISBN 978-5-7996-1198-9.

10. Введение в географические информационные системы и основы гис-анализа. – URL: [https://soil.msu.ru/attachments/article/2153/lecture1-2\\_GIS.pdf](https://soil.msu.ru/attachments/article/2153/lecture1-2_GIS.pdf). [Дата обращения: 16.10.2023]
11. Ветрова, Н. А. Анализ и моделирование технологических инноваций / Н. А. Ветрова, Е. Н. Горлачева, А. Г. Гудков // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2005. - №11. – С.47 –58.
12. ВМО. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО. Женева, 2019. – URL: <http://mgmtmo.ru/edumat/wmo/386.pdf>. [Дата обращения: 16.11.2023].
13. Военная топография. Базовый электронный учебник / А. В. Гаврилов, В. А. Андреев, Д. М. Петров и др.; под общ. ред. А. Н. Зализнюка. – Санкт-Петербург: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 527 с.
14. Гаскаров, Д. В. Информационная поддержка систем экологического контроля и управления / Д. В. Гаскаров, Е. П. Истомин, А. К. Фролов. – СПб.: Изд-во СПГУВК, 1999. – 253 с.
15. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / Ю. Б. Баранов, А. М. Берлянт, Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, Б. Б. Серапинас, Ю. А. Филиппов – Москва : ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с.
16. Гис-технология в метеорологии / Н. В. Жуковская. – Минск: БГУ, 2017.
17. Глушко, А. Я. Особенности управления затапливаемыми земельными ресурсами Юга России / А. Я Глушко // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4–2 (23). – С.62.
18. Горелов, В. Л. Основы прогнозирования систем. Учеб. пособие для инж.-экон. спец. вузов / В. Л. Горелов, Е. Н. Мельникова. – Москва : Высш. шк., 1986. – 285 с.
19. Горлачева, Е. Н. Механизм межфирменного взаимодействия / Е. Н. Горлачева // Инженер. Технолог. Рабочий. – 2008. – №4. – С.2–8.

20. Гурьянова Л. В. Введение в ГИС / Л. В. Гурьянова. – Минск : БГУ, 2008. – 135 с.
21. Дейт, К. Введение в системы баз данных / К. Дейт. – Москва ; Санкт-Петербург : Диалектика, 2019. – 1327 с. – ISBN 978-5-907144-17-0.
22. Дрейзин, В. Э. Типизация задач и методы анализа и поддержки принятия решений в геоинформационных автоматизированных системах управления / В. Э. Дрейзин // Информационные технологии. – 2003. – №3. – С. 2-8.
23. Дулин, С. К. Множественно-реляционная модель данных геоинформационной системы / С. К. Дулин, С. В. Духин // Сб. научных трудов III-го Международного научно-практического семинара «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». – М.: Физматлит, 2005. – С. 342– 350.
24. Духин, С. В. Формализация геоданных на основе множественно-реляционной модели / С. В. Духин // Системы и средства информатики. Специальный выпуск «Математические модели и методы информатики, стохастические технологии и системы». – Москва : ИПИ РАН, 2005. – С. 253– 269.
25. Европейская экономическая комиссия Организация Объединенных Наций. Управление риском трансграничных наводнений: опыт региона ЕЭК ООН. Нью-Йорк и Женева, 2009. [Электронный ресурс]. – URL: [https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/publications/documents/low\\_res\\_Flood\\_Management\\_ru.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/publications/documents/low_res_Flood_Management_ru.pdf) [Дата обращения: 16.10.2023].
26. Жученко, А. А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. В трех томах. / А. А. Жученко. – Москва: Агрорус, 2008. – 814 с. – ISBN 978-5-903413-01-0.
27. Исламова, А. Г. ГИС-оценка геосистем верховьев реки Чу (Кочкорский район) как основа анализа природных рисков и техногенных бедствий / А. Г. Исламова // Известия вузов. – 2014. – № 4. – С. 39–44.



28. Истомин, Е. П. Оценка риска экстремальных гидрометеорологических явлений / Е. П. Истомин, Л. С. Слесарева // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – № 16. – С. 14–21.

29. Истомин, Е. П. Приближенная оценка вероятности пребывания случайного процесса в заданной области / Е. П. Истомин // Труды МВТУ, Планирование и оценка результатов экспериментов. Выпуск 1. МВТУ. – 1987. – № 473. – С. 45–53.

30. Истомин, Е. П. Приближенный метод оценки математического ожидания времени невыхода двумерного управляемого случайного процесса из заданной области / Е. П. Истомин // Труды ВВМУРЭ им. А.С. Попова, 1992 г.

31. Истомин, Е. П. Применение стохастических моделей для прогнозирования рисков в геосистемах / Е. П. Истомин, Л. С. Слесарева // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 17. – С. 145–149.

32. Кадочников, А. А. Технология получения и обработки данных публичных каталогов спутниковых снимков для геоинформационного Интернет-портала / А. А. Кадочников, А. В. Токарев // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2008. – №4. – Т. 1. – С.387-398.

33. Казак, А. Ю. Современные методы оценки проектных рисков: традиции и инновации / А. Ю. Казак, Ю. Э. Слепухина // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. – 2013. – № 2. – С. 13–26.

34. Макаров В. З, Башкатов А. Н. Методы географических исследований. Саратов, 2011. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sgu.ru/archive/old.sgu.ru/files/nodes/19128/course.pdf>. [Дата обращения: 16.10.2022]

35. Калинин, В. Г. Основы геодезии и топографии. Часть II. практические аспекты / В. Г. Калинин, Д. Г. Тюняткин, К. Д. Микова. – Пермь : Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2018. – 82 с.

36. Карпова, И. П. Основы баз данных / И. П. Карпова. Москва, 2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://old.mipt.ru/dnbic/content/db.pdf?ysclid=lur9isi4a8629153430>. [Дата обращения: 16.10.2023].
37. Карташов, Г. Д. Об одной задаче отбора изделий / Г. Д. Карташов, И. Г. Шведова // Изд. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1983. – № 3. – С. 70–75.
38. Карташов, Г. Д. Теория вероятностей. Вероятностные модели / Г. Д. Карташов. – Москва : Изд-во МГТУ, 1990. – 62 с. – ISBN 5-7028-0511-2.
39. Картвелишвили, В. М. Риск-менеджмент. методы оценки риска / В. М. Картвелишвили, О. А. Свиридова. – Москва: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2017. – 120 с. – ISBN 978-5-7307-1239-3.
40. Коваленко, Н. И. Глобализация, пространственная информация, геоданные / Н. И. Коваленко // Славянский форум. – 2015. – №4 (10). – С. 147–156.
41. Ковин, Р. В. Геоинформационные системы: учебное пособие / Р. В. Ковин, Н. Г. Марков. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2008. – 174 с. – ISBN 5-98298-199-0.
42. Коробов, Р. Воздействие изменения климата на водные ресурсы и адаптационные нужды. – URL: [https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/meetings/Water.and.Climate/National\\_seminar\\_Kyrgyzstan/Corobov\\_general\\_rus.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/meetings/Water.and.Climate/National_seminar_Kyrgyzstan/Corobov_general_rus.pdf). [Дата обращения: 11.09.2023].
43. Костенко, И. П. Введение в вероятностное прогнозирование: курс лекций и упражнений / И. П. Костенко. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 314 с.
44. Куприянов, В. В. Параметрические и непараметрические модели прогнозирования нештатных ситуаций в подземных горных выработках / В. В. Куприянов, О. А. Мацкевич, И. С. Бондаренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 3. – С. 200–207.

45. Курганович, К. А. Управление риском наводнений в мире и в Российской Федерации / К. А. Курганович, А. В. Шаликовский // Вестник ЧитГУ. – 2012. – №5 (84). – С. 21– 31.
46. Лапина, С. Н. Обработка и анализ метеорологической информации / С. Н. Лапина, Г. Ф. Иванова, Н. В. Семенова – Саратов, 2011. [Электронный ресурс]. – URL: [http://elibrary.sgu.ru/uch\\_lit/120.pdf](http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/120.pdf). [Дата обращения: 16.10.2023].
47. Маддах, М. Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана / М. Маддах, И. Русин, А. Ахунд-Али // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2017. – Т. 586. – С. 191–204.
48. Макшанов, А. В. Стохастическое моделирование / А. В. Макшанов, А. А. Мусаев. – Санкт-Петербург. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://reader.lanbook.com/book/193308#1>. [Дата обращения: 12.12.2023]
49. Малинин, В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. В 2 т. / В. Н. Малинин. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2020.
50. Мамедли, Р. Э. Системы управления базами данных / Р. Э. Мамедли. Нижневартовск : Нижневартовский государственный университет, 2021. – 213 с. – ISBN 978-5-00047-585-0.
51. Национальный стандарт Российской Федерации. Географическая информация. Москва, 2009. [Электронный ресурс]. - URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293829/4293829029.pdf>. [дата обращения: 06.09.2023]
52. Ндикумана Э. Управление стихийными бедствиями, связанными с эрозией в республике Бурунди / Э. Ндикумана, Е. П. Истомин, Н. В. Яготинцева // Информация и космос. – 2022. – № 4. – С. 124–131.
53. Ндикумана, Э. Применения параметрической модели оценки рисков для сельскохозяйственных регионов Республики Бурунди / Э. Ндикумана, Е. П. Истомин, Н.В. Яготинцева. [Электронный ресурс]. – URL:

[https://www.infokosmo.ru/ru/article/17173/primeneniya\\_parametricheskoj\\_modeli\\_ocenki\\_risikov\\_dlyaselskohozyaystvennyh\\_regionov\\_respubliki\\_burundi/](https://www.infokosmo.ru/ru/article/17173/primeneniya_parametricheskoj_modeli_ocenki_risikov_dlyaselskohozyaystvennyh_regionov_respubliki_burundi/). [Дата обращения: 12.10.2023]

54. Обзор по стандартам ISO/TC 211 «Географическая информация / Геоматика». [Электронный ресурс]. - URL: [http://gistechinik.ru/book/Guide\\_russian.pdf](http://gistechinik.ru/book/Guide_russian.pdf). [Дата обращения: 15.10.2023]

55. Общая геоморфология: учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. / Г. И. Рычагов. – Москва: Изд-во Моск. ун-та: Наука, 2006. – 416 с.

56. ООН. Адаптация к изменению климата. – URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/climate-adaptation>. [Дата обращения: 13.09.2023].

57. Организационные мероприятия в связи с проведением межправительственных совещаний. – URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sbi2023\\_08R.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sbi2023_08R.pdf). [Дата обращения: 10.09.2023].

58. Основные понятия реляционной СУБД. – URL: <https://ideafix.su/wp-content/uploads/2012/05/Python-10.pdf> [дата обращения: 06.04.2023]

59. Петросян, Л. А. Введение в математическую экологию / Л. А. Петросян, В. В. Захаров. – Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. – 222 с.

60. Полищук, Ю. М. Картографирование экологических рисков воздействия нефтедобычи на растительный покров с использованием спутниковых данных / Ю. М. Полищук, О. С. Токарева. – URL: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/sb2010t3/269-274.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2010t3/269-274.pdf). [Дата обращения: 13.10.2023].

61. Представление пространственных данных в ГИС. – URL: [https://soil.msu.ru/attachments/article/1909/GIS\\_lecture3.pdf](https://soil.msu.ru/attachments/article/1909/GIS_lecture3.pdf). [Дата обращения: 15.10.2023]

62. Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций. Стратегическая рамочная программа на 2022-2031 годы.

– URL: <https://www.fao.org/3/cb7099ru/cb7099ru.pdf> [Дата обращения: 06.09.2023].

63. Проектирование интегрированных производственно-корпоративных структур: эффективность, организация, управление / под ред. А. А. Колобова, А. И. Орлова. – Москва: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 728 с.

64. Рассмотрение Советом Безопасности вопросов в порядке возложенной на него ответственности за поддержание международного мира и безопасности. – URL: [https://www.un.org/securitycouncil/sites/www.un.org.securitycouncil/files/ru\\_2019\\_01-3.pdf](https://www.un.org/securitycouncil/sites/www.un.org.securitycouncil/files/ru_2019_01-3.pdf). [Дата обращения: 06.09.2023].

65. Семушин И. В., Цыганова Ю. В. Стохастические модели, оценки и управление / И. В. Семушин, Ю. В. Цыганова. – Ульяновск, 2007. [Электронный ресурс]. – URL: [https://staff.ulsu.ru/semushin/\\_index/\\_pilocus/\\_gist/docs/mycourseware/13-stochmod/2-reading/det\\_models-of\\_dyn-sys=cut.pdf](https://staff.ulsu.ru/semushin/_index/_pilocus/_gist/docs/mycourseware/13-stochmod/2-reading/det_models-of_dyn-sys=cut.pdf). [Дата обращения: 13.10.2023].

66. Система управления базами данных SQL Server. – URL: [https://professorweb.ru/my/sql-server/2012/level1/1\\_1.php](https://professorweb.ru/my/sql-server/2012/level1/1_1.php) [дата обращения: 10.09.2023].

67. Скакун, В. В. Системы управления базами данных / В. В. Скакун. Минск: БГУ, 2007. [Электронный ресурс]. – URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/258089>. [Дата обращения: 15.10.2023].

68. Слесарева, Л. С. О некоторых вопросах прогнозирования нагонных наводнений / Л. С. Слесарева // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. Сб. науч. тр. – Вып. 1(6) – СПб: Андреевский издательский дом. – 2008. – С. 102–109.

69. Соколов, А. Г. Анализ современных моделей пространственного управления организационно-техническими системами / А. Г. Соколов, Я. А.

Петров // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2013. – № 2-2 (11). – С. 122–123.

70. Топографические съемки, инженерно-геодезические изыскания и построения. [Электронный ресурс] : методические указания к учебной геодезической практике / сост. В. Н. Анопин. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. – URL: [https://vgasu.ru/attachments/topografichsemki\\_anopin.pdf](https://vgasu.ru/attachments/topografichsemki_anopin.pdf) [Дата обращения: 16.10.2023].

71. Третья всемирная конференция ООН по уменьшению опасности бедствий. Протоколы. Сендай – Япония, 14–18 марта 2015 года. – URL: [https://www.unisdr.org/files/45069\\_proceedingsthirdunwcdrrru.pdf](https://www.unisdr.org/files/45069_proceedingsthirdunwcdrrru.pdf). [Дата обращения: 10.10.2023]

72. Тюрин, Ю. Н. Статистический анализ данных на компьютере / Ю. Н. Тюрин, А. А. Макаров; под ред. В. Э. Фигурнова. – Москва : ИНФРА-М, 1998. – 528 с.

73. Федерация европейских ассоциаций риск менеджеров. Стандарты управления рисками. Брюссель, 2002. [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.aosk.ru/about/vnutrenniy-kontrol-upravlenie-riskami/standart%20ferma\\_russia.pdf?ysclid=luratc7rzq425998784](https://www.aosk.ru/about/vnutrenniy-kontrol-upravlenie-riskami/standart%20ferma_russia.pdf?ysclid=luratc7rzq425998784). [Дата обращения: 9.11.2023].

74. Флоринский, И. В. Расчет производящей функции высоты для выделения структурных линий рельефа по спутниковым данным и топографическим картам / И. В. Флоринский // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 6. – С. 43 – 51.

75. Франс, Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торнли; под ред. Ф. И. Ерешко. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

76. Цветков, В. Я. Геоинформационные системы как новые автоматизированные системы управления / В. Я. Цветков, П. Д. Кужелев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. – №1. – С. 115–124.

77. Черниковский, Д. М. Влияние формы поверхности рельефа на структуру и продуктивность лесных ландшафтов (на примере заповедника Верхне-Тазовский Ямало-Ненецкий АО) / Д. М. Черниковский, А. С. Алексеев // Лесоведение. – 2003. – № 5. – С. 10–17.

78. Численный анализ атмосферных процессов: электронный учебно-методический комплекс / А. Г. Светашев, Н. В. Дорожко. – Минск: БГУ, 2021. – 96 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/270693>. [Дата обращения: 09.09.2023].

79. Чрезвычайные ситуации природного характера (стихийные бедствия). – URL: [https://old.volgmed.ru/uploads/files/2014-1/25280-chrezvychajnye\\_situacii\\_prirodnogo\\_haraktera.pdf](https://old.volgmed.ru/uploads/files/2014-1/25280-chrezvychajnye_situacii_prirodnogo_haraktera.pdf). [Дата обращения: 9.11.2023].

80. Чупикова, С. А. Геоинформационные и дистанционные методы при оценке загрязнения снежного покрова (г. Кызыл) / С. А. Чупикова, А. Ф. Чульдум // Геоинформатика. – 2023. – № 1. – С. 63– 70.

81. Шихов, А. Н. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова. – Пермь: Издательский центр Пермского государственного национального исследовательского университета, 2020. – 191 с. – ISBN978-5-7944-3476-7.

82. Шкурко, В. Е. Управление рисками проектов / В. Е. Шкурко. – Екатеринбург: изд-во Урал ун-та, 2014. – 184 с.

83. Шорохова, И. С. Статистические методы анализа / И. С. Шорохова, Н. В. Кисляк, О. С. Мариев. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 300 с.

84. Экономическая безопасность России: методология, стратегическое управление, системотехника : монография / кол.авторов; под науч. ред. С. Н. Сильвестрова. – Москва: РУСАЙНС, 2018. – 350 с. – ISBN 978-5-4365-2164-0.

85. Python. Лекция 8. Разработка WEB-приложений. – URL: <https://ideafix.su/wp-content/uploads/2012/05/Python-8.pdf>. [дата обращения: 06.04.2023].

86. Benson C. , Twigg J. Outils d'intégration de la réduction des risques de catastrophes. Janvier 2007. – URL:

[https://www.preventionweb.net/files/1066\\_toolsformainstreamingDRRfr1.pdf](https://www.preventionweb.net/files/1066_toolsformainstreamingDRRfr1.pdf)  
(accessed: 06.08.2023).

87. Bollin C., Fritzsche K., Ruzima S. et al. Analyse intégrée de la Vulnérabilité au Burundi. Décembre 2014. – URL: [https://www.adaptationcommunity.net/download/uploads/Volume\\_III\\_-\\_Version\\_Electronique\\_\\_\(2\).pdf](https://www.adaptationcommunity.net/download/uploads/Volume_III_-_Version_Electronique__(2).pdf). (accessed: 16.08.2023).

88. Burlov V. G., Istomin E. P., Abramov V. M., Fokicheva A. A., Sokolov A. G. 2018 Risk management method in parametric geosystems. *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Bulgaria. – vol. 18 (2.2). – P. 377.

89. Burundi Rapid Assessment with Focus on Flood Risk Management. – URL: <https://docplayer.fr/2539820-Republic-of-burundi-burundi-rapid-assessment-with-focus-on-flood-risk-management.html> (accessed: 06.09.2023).

90. Burundi: Scaling up Climate Resilience in the Land of 3,000 Hills. – URL: <https://blogs.worldbank.org/africacan/burundi-scaling-climate-resilience-land-3000-hills>. (accessed: 06.09.2023).

91. Climate Change 2023: Synthesis Report. Intergovernmental panel on climate change (IPCC). Synthesis Report. – URL: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf). (Accessed : 06.09.2023).

92. Cline W. R. Global warming and agriculture. 2008. – URL: [https://www.un.org//esa/sustdev/natlinfo/nsds/egm\\_ClimateChange/cline.pdf](https://www.un.org//esa/sustdev/natlinfo/nsds/egm_ClimateChange/cline.pdf). (accessed: 6.11.2023).

93. Élaboré dans le cadre du processus de préparation de la conférence des nations unies sur le développement durable au Burundi. – URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/804burndi.pdf>. (accessed: 11.09.2023).

94. ENA. Gestion des risques. Octobre 2020. – URL : [https://www.google.com/search?q=ENA.+Gestion+des+risques.+Octobre+2020&oq=ENA.+Gestion+des+risques.+Octobre+2020&gs\\_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEU](https://www.google.com/search?q=ENA.+Gestion+des+risques.+Octobre+2020&oq=ENA.+Gestion+des+risques.+Octobre+2020&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEU)



YOdIBCDQ5MjZqMGo3qAIAsAIA&sourceid=chrome&ie=UTF-8#vhid=zephyrhttps://www.ena.fr/content/download/1944/32635/version/17/file/bib\_gestion\_risques\_maj\_2020.pdf&vssid=collectionitem-web-desktophttps://www.ena.fr/content/download/1944/32635/version/17/file/bib\_gestion\_risques\_maj\_2020.pdf (accessed : 9.11.2023 ).

95. Giannaros T. M., Kotroni V., Lagouvardos K. Predicting lightning activity in Greece with the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Atmospheric Research*. 2015. V. 156. P. 1–13.

96. Hopkin P. *Fundamentals of Risk Management*. – London, 2017. – 357p. – URL: [https://www.booksfree.org/wp-content/uploads/2022/03/Fundamentals-of-Risk-Management-by-Paul-Hopkin-pdf-free-download-booksfree.org\\_.pdf](https://www.booksfree.org/wp-content/uploads/2022/03/Fundamentals-of-Risk-Management-by-Paul-Hopkin-pdf-free-download-booksfree.org_.pdf). (accessed: 26.08.2023).

97. Lacunes dans l'évaluation des risques climatiques : intégration transparente des informations météorologiques et climatiques pour la résilience des communautés. – URL: <https://council.science/fr/current/blog/climate-risk-assessment-gaps>. (accessed: 10.10.2023).

98. Leone F., Richemond de N. M., Freddy V. Aléas naturels et gestion des risques. 6 July 2021. – URL: <https://hal.science/hal-03279213>. (accessed : 16.10.2023).

99. Leone F., Richemond de N. M., Freddy V. Aléas naturels et gestion des risques. – Paris, 2010. – URL : [https://hal.science/hal-03279213/file/Aleas\\_Naturels\\_Et\\_Gestion\\_Des\\_Risques\\_2010\\_PUF\\_Leone\\_Vinet\\_MeschinetDeRichemond\\_Complet\\_leger.pdf](https://hal.science/hal-03279213/file/Aleas_Naturels_Et_Gestion_Des_Risques_2010_PUF_Leone_Vinet_MeschinetDeRichemond_Complet_leger.pdf). (accessed : 17.10.2023).

100. Liersch S. Rivas R., Fritzsche K., Liersch S. Rapport sur le changement climatique au Burundi. *Projections des changements climatiques pour le Burundi – Résumé*. – 2014. – URL: [https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/changement\\_climatique\\_au\\_burundi\\_r%C3%A9sum%C3%A9\\_fr\\_1.pdf](https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/changement_climatique_au_burundi_r%C3%A9sum%C3%A9_fr_1.pdf). (accessed : 03.11.2023).

101. Liersch S., Rivas R., Fritzsche K. Rapport sur le changement climatique au Burundi. Avril 2014. – URL: <https://bi.chm-cbd.net/fr/implementation/documents-envir-biodiv/rapp-change-climati-bi-decid/> (accessed : 04.11.2023).

102. Ministère de l'environnement, de l'agriculture et de l'élevage du Burundi. Stratégie nationale pour l'agriculture. Bujumbura, novembre 2018. – URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/Bur190783.pdf> (accessed: 05.11.2023).

103. Ndayizeye L., Bangirinama F., Niragira Ir S. Plan national de développement du Burundi PND Burundi 2018-2027. Juin 2018. – URL: <https://presidence.gov.bi/wp-content/uploads/2018/08/PND-Burundi-2018-2027-Version-Finale.pdf>. (accessed: 14.11.2023).

104. Niyongabo R., Malou R. Plan d'action national d'adaptation aux changements climatiques "PANA". Janvier 2007. – URL : <https://faolex.fao.org/docs/pdf/bur149855.pdf/>. (accessed : 16.11.2023).

105. Nzigadahera Benoît. Description du Burundi : Aspects physiques. 2012.– URL: <https://studylibfr.com/doc/3176202/aspects-physiques-du-burundi---chm?ysclid=lupy4jkr1v463607583>. (accessed : 16.11.2023 ).

106. Panégos J. Adaptation de l'agriculture aux inondations. *La réduction de la vulnérabilité des exploitations agricoles dans le cadre des Programmes d'Actions de Prévention des Inondations héraultais et le plan Rhône*. 2021. URL: <https://hal.science/CIRAD/hal-03554326/> (accessed: 16.11.2023).

107. Peggion M., Bernardini A., Masera M. Geographic Information Systems and Risk Assessment. Luxembourg: OPOCE. 2008. – URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC42503> (accessed: 16.11.2023).

108. Risk Management Strategy EEA & Norway Grants 2014-2021 / Financial Mechanism Committee. – 2016. – URL: <https://eeagrants.org/sites/default/files/resources/2014-2021%20Risk%20management%20strategy.pdf> (accessed: 11.04.2023).

109. Roissart de P. Développement de la gestion intégrée des ressources en eau (gire) dans la zone pilote Dama-Murembwe. Aout 2013. – URL:

[https://www.pseau.org/outils/ouvrages/giz\\_meeatu\\_developpement\\_de\\_la\\_gestion\\_in\\_tegree\\_des\\_ressource\\_en\\_eau\\_gire\\_dans\\_la\\_zone\\_pilote\\_dama\\_murembwe\\_2013.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/giz_meeatu_developpement_de_la_gestion_in_tegree_des_ressource_en_eau_gire_dans_la_zone_pilote_dama_murembwe_2013.pdf) . (accessed: 21.11.2023).

110. Rufyikiri Ir G. Cadre Stratégique de Croissance et de Lutte contre la Pauvreté CSLP II. Janvier 2012. – URL : <https://www.fao.org/3/az474f/az474f.pdf>. (accessed : 11.12.2023).

111. Sabushimike J. M. Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage du Burundi. Premier rapport biennal actualisé sur les changements climatiques au Burundi. Juin 2022. – URL : [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Burundi%20BUR%201%20Report%20\\_Francais.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Burundi%20BUR%201%20Report%20_Francais.pdf) (accessed : 7.11.2022).

112. Visual basic for applications (VBA). – URL: <https://www.testunlimited.com/pdf/an/E5061-90033.pdf>. (accessed: 9.11.2022).

**Реализация алгоритма модели оценки риска**

```
import os
os.getcwd()
print(os.getcwd())
import csv
f = open('rain2013.csv')
fichierCSV = csv.reader(f)
next(fichierCSV)
ruyigi = []
bujumbura=[]
karusi=[]
makamba=[]
gitega=[]
muyinga=[]
rwegura=[]
vyanda=[]
nyamuswaga=[]
kirundo=[]
exe1=[]
exe2=[]
exe3=[]
exe4=[]
exe5=[]
exe6=[]
exe7=[]
exe8=[]
for ligne in fichierCSV:
    x_ruy = float(ligne[0])
    buj=float(ligne[1])
    kar=float(ligne[2])
    mak=float(ligne[3])
    git=float(ligne[4])
    muy=float(ligne[5])
    rweg=float(ligne[6])
    vyan=float(ligne[7])
    nyam=float(ligne[8])
    kir=float(ligne[9])
    exem1=float(ligne[10])
```

```

exem2=float(ligne[11])
exem3=float(ligne[12])
exem4=float(ligne[13])
exem5=float(ligne[14])
exem6=float(ligne[15])
exem7=float(ligne[16])
exem8=float(ligne[17])
ruyigi.append(x_ruy)
bujumbura.append(buj)
karusi.append(kar)
makamba.append(mak)
gitega.append(git)
muyinga.append(muy)
rwegura.append(rweg)
vyanda.append(vyan)
nyamuswaga.append(nyam)
kirundo.append(kir)
exe1.append(exem1)
exe2.append(exem2)
exe3.append(exem3)
exe4.append(exem4)
exe5.append(exem5)
exe6.append(exem6)
exe7.append(exem7)
exe8.append(exem8)
''' numpy.correlate '''
import numpy as np
p=len(ruyigi)
p_buj=len(bujumbura)
p_kar=len(karusi)
p_mak=len(makamba)
p_git=len(gitega)
p_muy=len(muyinga)
p_rweg=len(rwegura)
p_vyan=len(vyanda)
p_nyam=len(nyamuswaga)
p_kir=len(kirundo)
p_exe1=len(exe1)
p_exe2=len(exe2)
p_exe3=len(exe3)
p_exe4=len(exe4)

```

```

p_exe5=len(exe5)
p_exe6=len(exe6)
p_exe7=len(exe7)
p_exe8=len(exe8)
q=round(p*2/3,0)
q_buj=round(p_buj*2/3,0)
q_kar=round(p_kar*2/3,0)
q_mak=round(p_mak*2/3,0)
q_git=round(p_git*2/3,0)
q_muy=round(p_muy*2/3,0)
q_rweg=round(p_rweg*2/3,0)
q_vyan=round(p_vyan*2/3,0)
q_nyam=round(p_nyam*2/3,0)
q_kir=round(p_kir*2/3,0)
q_exe1=round(p_exe1*2/3,0)
q_exe2=round(p_exe2*2/3,0)
q_exe3=round(p_exe3*2/3,0)
q_exe4=round(p_exe4*2/3,0)
q_exe5=round(p_exe5*2/3,0)
q_exe6=round(p_exe6*2/3,0)
q_exe7=round(p_exe7*2/3,0)
q_exe8=round(p_exe8*2/3,0)
n=int(q)
xo_ruy=ruyigi[n-1]
xo_buj=bujumbura[n-1]
xo_kar=karusi[n-1]
xo_mak=makamba[n-1]
xo_git=gitega[n-1]
xo_muy=muyinga[n-1]
xo_rweg=rwegura[n-1]
xo_vyan=vyanda[n-1]
xo_nyam=nyamuswaga[n-1]
xo_kir=kirundo[n-1]
xo_exe1=exe1[n-1]
xo_exe2=exe2[n-1]
xo_exe3=exe3[n-1]
xo_exe4=exe4[n-1]
xo_exe5=exe5[n-1]
xo_exe6=exe6[n-1]
xo_exe7=exe7[n-1]
xo_exe8=exe8[n-1]

```

```

data_ruy=np.array(ruyigi[0:n])
data_buj=np.array(bujumbura[0:n])
data_kar=np.array(karusi[0:n])
data_mak=np.array(makamba[0:n])
data_git=np.array(gitega[0:n])
data_muy=np.array(muyinga[0:n])
data_rweg=np.array(rwegura[0:n])
data_vyan=np.array(vyanda[0:n])
data_nyam=np.array(nyamuswaga[0:n])
data_kir=np.array(kirundo[0:n])
data_exe1=np.array(exe1[0:n])
data_exe2=np.array(exe2[0:n])
data_exe3=np.array(exe3[0:n])
data_exe4=np.array(exe4[0:n])
data_exe5=np.array(exe5[0:n])
data_exe6=np.array(exe6[0:n])
data_exe7=np.array(exe7[0:n])
data_exe8=np.array(exe8[0:n])
ruy_array = np.array(data_ruy)
buj_array = np.array(data_buj)
kar_array = np.array(data_kar)
mak_array = np.array(data_mak)
git_array = np.array(data_git)
muy_array = np.array(data_muy)
rweg_array = np.array(data_rweg)
vyand_array = np.array(data_vyan)
nyam_array = np.array(data_nyam)
kir_array = np.array(data_kir)
exe1_array=np.array(data_exe1)
exe2_array=np.array(data_exe2)
exe3_array=np.array(data_exe3)
exe4_array=np.array(data_exe4)
exe5_array=np.array(data_exe5)
exe6_array=np.array(data_exe6)
exe7_array=np.array(data_exe7)
exe8_array=np.array(data_exe8)
mean_ruy = round(np.mean(data_ruy),2)
mean_buj = round(np.mean(data_buj),2)
mean_kar = round(np.mean(data_kar),2)
mean_mak = round(np.mean(data_mak),2)
mean_git = round(np.mean(data_git),2)

```

```

mean_muy = round(np.mean(data_muy),2)
mean_rweg = round(np.mean(data_rweg),2)
mean_vyan = round(np.mean(data_vyan),2)
mean_nyam = round(np.mean(data_nyam),2)
mean_kir = round(np.mean(data_kir),2)
mean_exe1 = round(np.mean(data_exe1),2)
mean_exe2 = round(np.mean(data_exe2),2)
mean_exe3 = round(np.mean(data_exe3),2)
mean_exe4 = round(np.mean(data_exe4),2)
mean_exe5 = round(np.mean(data_exe5),2)
mean_exe6 = round(np.mean(data_exe6),2)
mean_exe7 = round(np.mean(data_exe7),2)
mean_exe8 = round(np.mean(data_exe8),2)
var_ruy = round(np.var(data_ruy),2)
var_buj = round(np.var(data_buj),2)
var_kar = round(np.var(data_kar),2)
var_mak = round(np.var(data_mak),2)
var_git = round(np.var(data_git),2)
var_muy = round(np.var(data_muy),2)
var_rweg = round(np.var(data_rweg),2)
var_vyan = round(np.var(data_vyan),2)
var_nyam = round(np.var(data_nyam),2)
var_kir = round(np.var(data_kir),2)
var_exe1 = round(np.var(data_exe1),2)
var_exe2 = round(np.var(data_exe2),2)
var_exe3 = round(np.var(data_exe3),2)
var_exe4 = round(np.var(data_exe4),2)
var_exe5 = round(np.var(data_exe5),2)
var_exe6 = round(np.var(data_exe6),2)
var_exe7 = round(np.var(data_exe7),2)
var_exe8 = round(np.var(data_exe8),2)
ndata_ruy = data_ruy - mean_ruy
ndata_buj = data_buj - mean_buj
ndata_kar = data_kar - mean_kar
ndata_mak = data_mak - mean_mak
ndata_git = data_git - mean_git
ndata_muy = data_muy - mean_muy
ndata_rweg = data_rweg - mean_rweg
ndata_vyan = data_vyan - mean_vyan
ndata_nyam = data_nyam - mean_nyam
ndata_kir = data_kir - mean_kir

```



```

ndata_exe1 = data_exe1 - mean_exe1
ndata_exe2 = data_exe2 - mean_exe2
ndata_exe3 = data_exe3 - mean_exe3
ndata_exe4 = data_exe4 - mean_exe4
ndata_exe5 = data_exe5 - mean_exe5
ndata_exe6 = data_exe6 - mean_exe6
ndata_exe7 = data_exe7 - mean_exe7
ndata_exe8 = data_exe8 - mean_exe8
acorr_ruy = np.correlate(ndata_ruy, ndata_ruy, 'full')[len(ndata_ruy)-1:]
acorr_ruy = acorr_ruy / var_ruy / len(ndata_ruy)
acorr_buj = np.correlate(ndata_buj, ndata_buj, 'full')[len(ndata_buj)-1:]
acorr_buj = acorr_buj / var_buj / len(ndata_buj)
acorr_kar = np.correlate(ndata_kar, ndata_kar, 'full')[len(ndata_kar)-1:]
acorr_kar = acorr_kar / var_kar / len(ndata_kar)
acorr_mak = np.correlate(ndata_mak, ndata_mak, 'full')[len(ndata_mak)-1:]
acorr_mak = acorr_mak / var_mak / len(ndata_mak)
acorr_git = np.correlate(ndata_git, ndata_git, 'full')[len(ndata_git)-1:]
acorr_git = acorr_git / var_git / len(ndata_git)
acorr_muy = np.correlate(ndata_muy, ndata_muy, 'full')[len(ndata_muy)-1:]
acorr_muy = acorr_muy / var_muy / len(ndata_muy)
acorr_rweg = np.correlate(ndata_rweg, ndata_rweg, 'full')[len(ndata_rweg)-1:]
acorr_rweg = acorr_rweg / var_rweg / len(ndata_rweg)
acorr_vyan = np.correlate(ndata_vyan, ndata_vyan, 'full')[len(ndata_vyan)-1:]
acorr_vyan = acorr_vyan / var_vyan / len(ndata_vyan)
acorr_nyam = np.correlate(ndata_nyam, ndata_nyam, 'full')[len(ndata_nyam)-1:]
acorr_nyam = acorr_nyam / var_nyam / len(ndata_nyam)
acorr_kir = np.correlate(ndata_kir, ndata_kir, 'full')[len(ndata_kir)-1:]
acorr_kir = acorr_kir / var_kir / len(ndata_kir)
acorr_exe1 = np.correlate(ndata_exe1, ndata_exe1, 'full')[len(ndata_exe1)-1:]
acorr_exe1 = acorr_exe1 / var_exe1 / len(ndata_exe1)
acorr_exe2 = np.correlate(ndata_exe2, ndata_exe2, 'full')[len(ndata_exe2)-1:]
acorr_exe2 = acorr_exe2 / var_exe2 / len(ndata_exe2)
acorr_exe3 = np.correlate(ndata_exe3, ndata_exe3, 'full')[len(ndata_exe3)-1:]
acorr_exe3 = acorr_exe3 / var_exe3 / len(ndata_exe3)
acorr_exe4 = np.correlate(ndata_exe4, ndata_exe4, 'full')[len(ndata_exe4)-1:]
acorr_exe4 = acorr_exe4 / var_exe4 / len(ndata_exe4)
acorr_exe5 = np.correlate(ndata_exe5, ndata_exe5, 'full')[len(ndata_exe5)-1:]
acorr_exe5 = acorr_exe5 / var_exe5 / len(ndata_exe5)
acorr_exe6 = np.correlate(ndata_exe6, ndata_exe6, 'full')[len(ndata_exe6)-1:]
acorr_exe6 = acorr_exe6 / var_exe6 / len(ndata_exe6)

```

```

acorr_exe7 = np.correlate(ndata_exe7, ndata_exe7, 'full')[len(ndata_exe7)-1:]
acorr_exe7 = acorr_exe7 / var_exe7 / len(ndata_exe7)
acorr_exe8 = np.correlate(ndata_exe8, ndata_exe8, 'full')[len(ndata_exe8)-1:]
acorr_exe8 = acorr_exe8 / var_exe7 / len(ndata_exe8)
rx_ruy=sum(acorr_ruy)/len(acorr_ruy)
rx_buj=sum(acorr_buj)/len(acorr_buj)
rx_kar=sum(acorr_kar)/len(acorr_kar)
rx_mak=sum(acorr_mak)/len(acorr_mak)
rx_git=sum(acorr_git)/len(acorr_git)
rx_muy=sum(acorr_muy)/len(acorr_muy)
rx_rweg=sum(acorr_rweg)/len(acorr_rweg)
rx_vyan=sum(acorr_vyan)/len(acorr_vyan)
rx_nyam=sum(acorr_ruy)/len(acorr_nyam)
rx_kir=sum(acorr_kir)/len(acorr_kir)
rx_exe1=sum(acorr_exe1)/len(acorr_exe1)
rx_exe2=sum(acorr_exe2)/len(acorr_exe2)
rx_exe3=sum(acorr_exe3)/len(acorr_exe3)
rx_exe4=sum(acorr_exe4)/len(acorr_exe4)
rx_exe5=sum(acorr_exe5)/len(acorr_exe5)
rx_exe6=sum(acorr_exe6)/len(acorr_exe6)
rx_exe7=sum(acorr_exe7)/len(acorr_exe7)
rx_exe8=sum(acorr_exe8)/len(acorr_exe8)
import math
sko_ruy=round(math.sqrt(var_ruy),2)
sko_buj=round(math.sqrt(var_buj),2)
sko_kar=round(math.sqrt(var_kar),2)
sko_mak=round(math.sqrt(var_mak),2)
sko_git=round(math.sqrt(var_git),2)
sko_muy=round(math.sqrt(var_muy),2)
sko_rweg=round(math.sqrt(var_rweg),2)
sko_vyan=round(math.sqrt(var_vyan),2)
sko_nyam=round(math.sqrt(var_nyam),2)
sko_kir=round(math.sqrt(var_kir),2)
sko_exe1=round(math.sqrt(var_exe1),2)
sko_exe2=round(math.sqrt(var_exe2),2)
sko_exe3=round(math.sqrt(var_exe3),2)
sko_exe4=round(math.sqrt(var_exe4),2)
sko_exe5=round(math.sqrt(var_exe5),2)
sko_exe6=round(math.sqrt(var_exe6),2)
sko_exe7=round(math.sqrt(var_exe7),2)
sko_exe8=round(math.sqrt(var_exe8),2)

```

```

f = open('level_r.csv')
fichierlevel = csv.reader(f)
listel = []
for lig in fichierlevel:
    l = float(lig[0])
    listel.append(l)
bo=sum(listel)/len(listel)
b1=int(bo)
essai_ruy=mean_ruy-rx_ruy*(xo_ruy-mean_ruy)
essai_buj=mean_buj-rx_buj*(xo_buj-mean_buj)
essai_kar=mean_kar-rx_kar*(xo_kar-mean_kar)
essai_mak=mean_mak-rx_mak*(xo_mak-mean_mak)
essai_git=mean_git-rx_git*(xo_git-mean_git)
essai_muy=mean_muy-rx_muy*(xo_muy-mean_muy)
essai_rweg=mean_rweg-rx_rweg*(xo_rweg-mean_rweg)
essai_vyan=mean_vyan-rx_vyan*(xo_vyan-mean_vyan)
essai_nyam=mean_nyam-rx_nyam*(xo_nyam-mean_nyam)
essai_kir=mean_kir-rx_kir*(xo_kir-mean_kir)
essai_exe1=mean_exe1-rx_exe1*(xo_exe1-mean_exe1)
essai_exe2=mean_exe2-rx_exe2*(xo_exe2-mean_exe2)
essai_exe3=mean_exe3-rx_exe3*(xo_exe3-mean_exe3)
essai_exe4=mean_exe4-rx_exe4*(xo_exe4-mean_exe4)
essai_exe5=mean_exe5-rx_exe5*(xo_exe5-mean_exe5)
essai_exe6=mean_exe6-rx_exe6*(xo_exe6-mean_exe6)
essai_exe7=mean_exe7-rx_exe7*(xo_exe7-mean_exe7)
essai_exe8=mean_exe8-rx_exe8*(xo_exe8-mean_exe8)
essai_1_ruy=b1-essai_ruy
essai_1_buj=b1-essai_buj
essai_1_kar=b1-essai_kar
essai_1_mak=b1-essai_mak
essai_1_git=b1-essai_git
essai_1_muy=b1-essai_muy
essai_1_rweg=b1-essai_rweg
essai_1_vyan=b1-essai_vyan
essai_1_nyam=b1-essai_nyam
essai_1_kir=b1-essai_kir
essai_1_exe1=b1-essai_exe1
essai_1_exe2=b1-essai_exe2
essai_1_exe3=b1-essai_exe3
essai_1_exe4=b1-essai_exe4
essai_1_exe5=b1-essai_exe5

```

essai\_1\_exe6=b1-essai\_exe6  
 essai\_1\_exe7=b1-essai\_exe7  
 essai\_1\_exe8=b1-essai\_exe8  
 diviseur\_ruy=sko\_ruy\*math.sqrt(1-rx\_ruy\*rx\_ruy)  
 diviseur\_buj=sko\_buj\*math.sqrt(1-rx\_buj\*rx\_buj)  
 diviseur\_kar=sko\_kar\*math.sqrt(1-rx\_kar\*rx\_kar)  
 diviseur\_mak=sko\_mak\*math.sqrt(1-rx\_mak\*rx\_mak)  
 diviseur\_git=sko\_git\*math.sqrt(1-rx\_git\*rx\_git)  
 diviseur\_muy=sko\_muy\*math.sqrt(1-rx\_muy\*rx\_muy)  
 diviseur\_rweg=sko\_rweg\*math.sqrt(1-rx\_rweg\*rx\_rweg)  
 diviseur\_vyan=sko\_vyan\*math.sqrt(1-rx\_vyan\*rx\_vyan)  
 diviseur\_nyam=sko\_nyam\*math.sqrt(1-rx\_nyam\*rx\_nyam)  
 diviseur\_kir=sko\_kir\*math.sqrt(1-rx\_kir\*rx\_kir)  
 diviseur\_exe1=sko\_exe1\*math.sqrt(1-rx\_exe1\*rx\_exe1)  
 diviseur\_exe2=sko\_exe2\*math.sqrt(1-rx\_exe2\*rx\_exe2)  
 diviseur\_exe3=sko\_exe3\*math.sqrt(1-rx\_exe3\*rx\_exe3)  
 diviseur\_exe4=sko\_exe4\*math.sqrt(1-rx\_exe4\*rx\_exe4)  
 diviseur\_exe5=sko\_exe5\*math.sqrt(1-rx\_exe5\*rx\_exe5)  
 diviseur\_exe6=sko\_exe6\*math.sqrt(1-rx\_exe6\*rx\_exe6)  
 diviseur\_exe7=sko\_exe7\*math.sqrt(1-rx\_exe7\*rx\_exe7)  
 diviseur\_exe8=sko\_exe8\*math.sqrt(1-rx\_exe6\*rx\_exe8)  
 part1\_ruy=(b1-essai\_ruy)/diviseur\_ruy  
 part1\_buj=(b1-essai\_buj)/diviseur\_buj  
 part1\_kar=(b1-essai\_kar)/diviseur\_kar  
 part1\_mak=(b1-essai\_mak)/diviseur\_mak  
 part1\_git=(b1-essai\_git)/diviseur\_git  
 part1\_muy=(b1-essai\_muy)/diviseur\_muy  
 part1\_rweg=(b1-essai\_rweg)/diviseur\_rweg  
 part1\_vyan=(b1-essai\_vyan)/diviseur\_vyan  
 part1\_nyam=(b1-essai\_nyam)/diviseur\_nyam  
 part1\_kir=(b1-essai\_kir)/diviseur\_kir  
 part1\_exe1=(b1-essai\_exe1)/diviseur\_exe1  
 part1\_exe2=(b1-essai\_exe2)/diviseur\_exe2  
 part1\_exe3=(b1-essai\_exe2)/diviseur\_exe3  
 part1\_exe4=(b1-essai\_exe4)/diviseur\_exe4  
 part1\_exe5=(b1-essai\_exe5)/diviseur\_exe5  
 part1\_exe6=(b1-essai\_exe6)/diviseur\_exe6  
 part1\_exe7=(b1-essai\_exe7)/diviseur\_exe7  
 part1\_exe8=(b1-essai\_exe8)/diviseur\_exe8  
 part2\_ruy=(-essai\_ruy/diviseur\_ruy)  
 part2\_buj=(-essai\_kar/diviseur\_kar)

```

part2_kar=(-essai_kar/diviseur_kar)
part2_mak=(-essai_mak/diviseur_mak)
part2_git=(-essai_git/diviseur_git)
part2_muy=(-essai_muy/diviseur_muy)
part2_rweg=(-essai_rweg/diviseur_rweg)
part2_vyan=(-essai_vyan/diviseur_vyan)
part2_nyam=(-essai_nyam/diviseur_nyam)
part2_kir=(-essai_kir/diviseur_kir)
part2_exe1=(-essai_exe1/diviseur_exe1)
part2_exe2=(-essai_exe2/diviseur_exe2)
part2_exe3=(-essai_exe3/diviseur_exe3)
part2_exe4=(-essai_exe4/diviseur_exe4)
part2_exe5=(-essai_exe5/diviseur_exe5)
part2_exe6=(-essai_exe6/diviseur_exe6)
part2_exe7=(-essai_exe7/diviseur_exe7)
part2_exe8=(-essai_exe8/diviseur_exe8)
from scipy.stats import norm
Laplace_part1_ruy=norm.cdf(part1_ruy)-0.5
Laplace_part1_buj=norm.cdf(part1_buj)-0.5
Laplace_part1_kar=norm.cdf(part1_kar)-0.5
Laplace_part1_mak=norm.cdf(part1_mak)-0.5
Laplace_part1_git=norm.cdf(part1_git)-0.5
Laplace_part1_muy=norm.cdf(part1_muy)-0.5
Laplace_part1_rweg=norm.cdf(part1_rweg)-0.5
Laplace_part1_vyan=norm.cdf(part1_vyan)-0.5
Laplace_part1_nyam=norm.cdf(part1_nyam)-0.5
Laplace_part1_kir=norm.cdf(part1_kir)-0.5
Laplace_part1_exe1=norm.cdf(part1_exe1)-0.5
Laplace_part1_exe2=norm.cdf(part1_exe2)-0.5
Laplace_part1_exe3=norm.cdf(part1_exe3)-0.5
Laplace_part1_exe4=norm.cdf(part1_exe4)-0.5
Laplace_part1_exe5=norm.cdf(part1_exe5)-0.5
Laplace_part1_exe6=norm.cdf(part1_exe6)-0.5
Laplace_part1_exe7=norm.cdf(part1_exe7)-0.5
Laplace_part1_exe8=norm.cdf(part1_exe8)-0.5
Laplace_part2_ruy=norm.cdf(part2_ruy)-0.5
Laplace_part2_buj=norm.cdf(part2_buj)-0.5
Laplace_part2_kar=norm.cdf(part2_kar)-0.5
Laplace_part2_mak=norm.cdf(part2_mak)-0.5
Laplace_part2_git=norm.cdf(part2_git)-0.5
Laplace_part2_muy=norm.cdf(part2_muy)-0.5

```

Laplace\_part2\_rweg=norm.cdf(part2\_rweg)-0.5  
 Laplace\_part2\_vyan=norm.cdf(part2\_vyan)-0.5  
 Laplace\_part2\_nyam=norm.cdf(part2\_nyam)-0.5  
 Laplace\_part2\_kir=norm.cdf(part2\_kir)-0.5  
 Laplace\_part2\_exe1=norm.cdf(part2\_exe1)-0.5  
 Laplace\_part2\_exe2=norm.cdf(part2\_exe2)-0.5  
 Laplace\_part2\_exe3=norm.cdf(part2\_exe3)-0.5  
 Laplace\_part2\_exe4=norm.cdf(part2\_exe4)-0.5  
 Laplace\_part2\_exe5=norm.cdf(part2\_exe5)-0.5  
 Laplace\_part2\_exe6=norm.cdf(part2\_exe6)-0.5  
 Laplace\_part2\_exe7=norm.cdf(part2\_exe7)-0.5  
 Laplace\_part2\_exe8=norm.cdf(part2\_exe8)-0.5  
 probability\_ruy=round(Laplace\_part1\_ruy-Laplace\_part2\_ruy,2)  
 probability\_buj=round(Laplace\_part1\_buj-Laplace\_part2\_buj,2)  
 probability\_kar=round(Laplace\_part1\_kar-Laplace\_part2\_kar,2)  
 probability\_mak=round(Laplace\_part1\_mak-Laplace\_part2\_git,2)  
 probability\_muy=round(Laplace\_part1\_muy-Laplace\_part2\_muy,2)  
 probability\_git=round(Laplace\_part1\_git-Laplace\_part2\_git,2)  
 probability\_rweg=round(Laplace\_part1\_rweg-Laplace\_part2\_rweg,2)  
 probability\_vyan=round(Laplace\_part1\_vyan-Laplace\_part2\_vyan,2)  
 probability\_nyam=round(Laplace\_part1\_nyam-Laplace\_part2\_nyam,2)  
 probability\_kir=round(Laplace\_part1\_kir-Laplace\_part2\_kir,2)  
 probability\_exe1=round(Laplace\_part1\_exe1-Laplace\_part2\_exe1,2)  
 probability\_exe2=round(Laplace\_part1\_exe2-Laplace\_part2\_exe2,2)  
 probability\_exe3=round(Laplace\_part1\_exe3-Laplace\_part2\_exe3,2)  
 probability\_exe4=round(Laplace\_part1\_exe4-Laplace\_part2\_exe4,2)  
 probability\_exe5=round(Laplace\_part1\_exe5-Laplace\_part2\_exe5,2)  
 probability\_exe6=round(Laplace\_part1\_exe6-Laplace\_part2\_exe6,2)  
 probability\_exe7=round(Laplace\_part1\_exe7-Laplace\_part2\_exe7,2)  
 probability\_exe8=round(Laplace\_part1\_exe8-Laplace\_part2\_exe8,2)  
 risk\_ruy=round(1-probability\_ruy,2)  
 risk\_buj=round(1-probability\_buj,2)  
 risk\_kar=round(1-probability\_kar,2)  
 risk\_mak=round(1-probability\_mak,2)  
 risk\_git=round(1-probability\_git,2)  
 risk\_muy=round(1-probability\_muy,2)  
 risk\_rweg=round(1-probability\_rweg,2)  
 risk\_vyan=round(1-probability\_vyan,2)  
 risk\_nyam=round(1-probability\_nyam,2)  
 risk\_kir=round(1-probability\_kir,2)  
 risk\_exe1=round(1-probability\_exe1,2)

```

risk_exe2=round(1-probability_exe2,2)
risk_exe3=round(1-probability_exe3,2)
risk_exe4=round(1-probability_exe4,2)
risk_exe5=round(1-probability_exe5,2)
risk_exe6=round(1-probability_exe6,2)
risk_exe7=round(1-probability_exe7,2)
risk_exe8=round(1-probability_exe8,2)
import numpy as np
a_ruy=np.array(ruyigi)
a_buj=np.array(bujumbura)
a_kar=np.array(karusi)
a_mak=np.array(makamba)
a_git=np.array(gitega)
a_muy=np.array(muyinga)
a_rweg=np.array(rwegura)
a_vyan=np.array(vyanda)
a_nyam=np.array(nyamuswaga)
a_kir=np.array(kirundo)
a_exe1=np.array(exe1)
a_exe2=np.array(exe2)
a_exe3=np.array(exe3)
a_exe4=np.array(exe4)
a_exe5=np.array(exe5)
a_exe6=np.array(exe6)
a_exe7=np.array(exe7)
a_exe8=np.array(exe8)
b_level=np.array(listel)
c_ruy=a_ruy-b_level
if max(c_ruy)<0:
    ito_ruy=0
else:
    arr_ruy=c_ruy
    arr_ruy = arr_ruy[arr_ruy>=0]
    ito_ruy=round(sum(arr_ruy)/(max(arr_ruy)*len(arr_ruy)),2)
c_buj=a_buj-b_level
if max(c_buj)<0:
    ito_buj=0
else:
    arr_buj=c_buj
    arr_buj = arr_buj[arr_buj>=0]
    ito_buj=round(sum(arr_buj)/(max(arr_buj)*len(arr_buj)),2)

```

```

c_kar=a_kar-b_level
if max(c_kar)<0:
    ito_kar=0
else:
    arr_kar=c_kar
    arr_kar = arr_kar[arr_kar>=0]
    ito_kar=round(sum(arr_kar)/(max(arr_kar)*len(arr_kar)),2)
c_mak=a_mak-b_level
if max(c_mak)<0:
    ito_mak=0
else:
    arr_mak=c_mak
    arr_mak = arr_mak[arr_mak>=0]
    ito_mak=round(sum(arr_mak)/(max(arr_mak)*len(arr_mak)),2)
c_git=a_git-b_level
if max(c_git)<0:
    ito_git=0
else:
    arr_git=c_git
    arr_git = arr_git[arr_git>=0]
    ito_git=round(sum(arr_git)/(max(arr_git)*len(arr_git)),2)
c_muy=a_muy-b_level
if max(c_muy)<0:
    ito_muy=0
else:
    arr_muy=c_muy
    arr_muy = arr_muy[arr_muy>=0]
    ito_muy=round(sum(arr_muy)/(max(arr_muy)*len(arr_muy)),2)
c_rweg=a_rweg-b_level
if max(c_rweg)<0:
    ito_rweg=0
else:
    arr_rweg=c_rweg
    arr_rweg = arr_rweg[arr_rweg>=0]
    ito_rweg=round(sum(arr_rweg)/(max(arr_rweg)*len(arr_rweg)),4)
c_vyan=a_vyan-b_level
if max(c_vyan)<0:
    ito_vyan=0
else:
    arr_vyan=c_vyan
    arr_vyan = arr_vyan[arr_vyan>=0]

```



```

    ito_vyan=round(sum(arr_vyan)/(max(arr_vyan)*len(arr_vyan)),2)
c_nyam=a_nyam-b_level
if max(c_nyam)<0:
    ito_nyam=0
else:
    arr_nyam=c_nyam
    arr_nyam = arr_nyam[arr_nyam>=0]
    ito_nyam=round(sum(arr_nyam)/(max(arr_nyam)*len(arr_nyam)),2)
c_kir=a_kir-b_level
if max(c_kir)<0:
    ito_kir=0
else:
    arr_kir=c_kir
    arr_kir = arr_kir[arr_kir>=0]
    ito_kir=round(sum(arr_kir)/(max(arr_kir)*len(arr_kir)),2)
c_exe1=a_exe1-b_level
if max(c_exe1)<0:
    ito_exe1=0
else:
    arr_exe1=c_exe1
    arr_exe1 = arr_exe1[arr_exe1>=0]
    ito_exe1=round(sum(arr_exe1)/(max(arr_exe1)*len(arr_exe1)),2)
c_exe2=a_exe2-b_level
if max(c_exe2)<0:
    ito_exe2=0
else:
    arr_exe2=c_exe2
    arr_exe2 = arr_exe2[arr_exe2>=0]
    ito_exe2=round(sum(arr_exe2)/(max(arr_exe2)*len(arr_exe2)),2)
c_exe3=a_exe3-b_level
if max(c_exe3)<0:
    ito_exe3=0
else:
    arr_exe3=c_exe3
    arr_exe3 = arr_exe3[arr_exe3>=0]
    ito_exe3=round(sum(arr_exe3)/(max(arr_exe3)*len(arr_exe3)),2)
c_exe4=a_exe4-b_level
if max(c_exe4)<0:
    ito_exe4=0
else:
    arr_exe4=c_exe4

```

```

arr_exe4 = arr_exe4[arr_exe4>=0]
ito_exe4=round(sum(arr_exe4)/(max(arr_exe4)*len(arr_exe4)),2)
c_exe5=a_exe5-b_level
if max(c_exe5)<0:
    ito_exe5=0
else:
    arr_exe5=c_exe5
    arr_exe5 = arr_exe5[arr_exe5>=0]
    ito_exe5=round(sum(arr_exe5)/(max(arr_exe5)*len(arr_exe5)),2)
c_exe6=a_exe6-b_level
if max(c_exe6)<0:
    ito_exe6=0
else:
    arr_exe6=c_exe6
    arr_exe6 = arr_exe6[arr_exe2>=0]
    ito_exe6=round(sum(arr_exe6)/(max(arr_exe6)*len(arr_exe6)),2)
c_exe7=a_exe7-b_level
if max(c_exe7)<0:
    ito_exe7=0
else:
    arr_exe7=c_exe7
    arr_exe7 = arr_exe7[arr_exe7>=0]
    ito_exe7=round(sum(arr_exe7)/(max(arr_exe7)*len(arr_exe7)),2)
c_exe8=a_exe8-b_level
if max(c_exe8)<0:
    ito_exe8=0
else:
    arr_exe8=c_exe8
    arr_exe8 = arr_exe8[arr_exe8>=0]
    ito_exe8=round(sum(arr_exe8)/(max(arr_exe8)*len(arr_exe8)),2)
f = open('result.csv', 'w')
writer = csv.writer(f)
header =
['station_id','station_name','x_long','y_lat','probabiliti','risk','damage_id','mean_
data','variance','st_dev']
data = [
    [1,'Gitega',29.93,-
3.4,probability_ruy,risk_ruy,ito_ruy,mean_ruy,var_ruy,sko_ruy],
    [2,'Kirundo',30.1,-
2.6,probability_buj,risk_buj,ito_buj,mean_buj,var_buj,sko_buj],

```

```

    [3,'Muyinga',30.3,-
2.9,probability_kar,risk_kar,ito_kar,mean_kar,var_kar,sko_kar],
    [4,'Ngozi',30,-
2.9,probability_mak,risk_mak,ito_mak,mean_mak,var_mak,sko_mak],
    [5,'Makamba',29.8,-
4.1,probability_muy,risk_muy,ito_muy,mean_muy,var_muy,sko_muy],
    [6,'Rutana',30.07,-
3.9,probability_git,risk_git,ito_git,mean_git,var_git,sko_git],
    [7, 'Cibitoke', 30.24, -3.47, probability_rweg, risk_rweg, ito_rweg,
mean_rweg, var_rweg, sko_rweg],
    [8,'Cankuzo', 30.6, -3.17, probability_vyan, risk_vyan, ito_vyan,
mean_vyan, var_vyan, sko_vyan],
    [9,'KARUZI',30.16,-
3.1,probability_nyam,risk_nyam,ito_nyam,mean_nyam,var_nyam,sko_nyam],
    [10,'Cibitoke',29.23,-
2.84,probability_kir,risk_kir,ito_kir,mean_kir,var_kir,sko_kir],
    [11, 'Kayanza',29.5,-2.9, probability_exe1, risk_exe1, ito_exe1, mean_exe1,
var_exe1, sko_exe1],
    [12,'Bubanza',29.4,-
3.17,probability_exe2,risk_exe2,ito_exe2,mean_exe2,var_exe2,sko_exe2],
    [13,'Muramvya',29.63,-
3.3,probability_exe3,risk_exe3,ito_exe3,mean_exe3,var_exe3,sko_exe3],
    [14,'Bujumbura Rural',29.5,-3.42, probability_exe4, risk_exe4, ito_exe4,
mean_exe4, var_exe4, sko_exe4],
    [15,'Bujumbura Mairie', 29.35, -3.4, probability_exe5, risk_exe5,
ito_exe5, mean_exe5, var_exe5, sko_exe5],
    [16,'Bururi',29.7,-
3.9,probability_exe6,risk_exe6,ito_exe6,mean_exe6,var_exe6,sko_exe6],
    [17,'Mwaro',29.7,-
3.5,probability_exe7,risk_exe7,ito_exe7,mean_exe7,var_exe7,sko_exe7],
    [18,'Rumonge',30.3,-
2.9,probability_exe8,risk_exe8,ito_exe8,mean_exe8,var_exe8,sko_exe8],
writer.writerow(header)
# write a row to the csv file
writer.writerows(data)
f.close()
import pandas as pd
data=pd.read_csv("result.csv")
df=data.dropna(axis=0, how="any")
df.to_csv("file_output.csv")
import psycopg2

```

```

from config import host,user,password,db_name
try:
    connection=psycpg2.connect(
        host=host,
        user=user,
        password=password,
        database=db_name
    )
    connection.autocommit=True
    with connection.cursor() as cursor:
        cursor.execute(
            "SELECT version();"
        )
    with connection.cursor() as cursor:
        cursor.execute(
            """"SELECT*FROM result1;""""
        )

    lig=[]
    for n in cursor.fetchall():
        dd=np.array(n)
        pp=float(dd[5])
        lig.append(pp)
        laf=np.array(lig)
        kok=sum(laf)
    print(laf)
except Exception as _ex:
    print("[INFO]Error while working with PostgreSQL", _ex)
finally:
    if connection:
        connection.close()
        print("[INFO] PostgreSQL connection closed")

```

### Реализация алгоритма создания GUI Модели оценки риска

```

import tkinter as tk
from tkinter import*
count = 3
root_WIND = tk.Tk()
root_WIND.title("Модель оценки георисков")
root_WIND.geometry("1500x400")
root_WIND.minsize(240, 90)
root_WIND.config(background="#D0C737")
my_frame=LabelFrame(root_WIND)
my_frame.place(relx=0.5, rely=0.2, anchor=CENTER)
valeur_actuelle=Label(my_frame, text='Начальное значение',font=("Colonna
MT",10),bg="#2A66F0",fg="#EBF1EB")
valeur_actuelle.grid(row=1, column=0,pady=10,padx=8)
moyenne=Label(my_frame, text='Матожидание',font=("Colonna
MT",10),bg="#2A66F0",fg="#EBF1EB")
moyenne.grid(row=1, column=1,pady=10,padx=8)
autocorrelation=Label(my_frame, text='Коэффициент
автокорреляции',font=("Colonna MT",10),bg="#2A66F0",fg="#EBF1EB")
autocorrelation.grid(row=1, column=2,pady=10,padx=8)
sko=Label(my_frame, text='Среднее Квадратическое
отклонение',font=("Colonna MT",10),bg="#2A66F0",fg="#EBF1EB")
sko.grid(row=1, column=3,pady=10,padx=8)
level=Label(my_frame, text='Верхний уровень допустимого
значения',font=("Colonna MT",10),bg="#2A66F0",fg="#EBF1EB")
level.grid(row=1, column=4,pady=10,padx=8)
level_low=Label(my_frame, text='Нижний уровень допустимого
значения',font=("Colonna MT",10),bg="#2A66F0",fg="#EBF1EB")
level_low.grid(row=1, column=5,pady=10,padx=8)
forecast=Label(my_frame, text='Глубина прогноза',font=("Colonna
MT",10),bg="#2A66F0",fg="#EBF1EB")
forecast.grid(row=1, column=6,pady=10,padx=8)
valeur_actuelle_input= tk.Entry(my_frame, width=22, font=('Arial 8'))
valeur_actuelle_input.grid(row=2, column=0,pady=10,padx=8)
moyenne_input= tk.Entry(my_frame,width=15, font=('Arial 8'))
moyenne_input.grid(row=2, column=1,pady=10,padx=8)
autocorrelation_input= tk.Entry(my_frame,width=34, font=('Arial 8'))
autocorrelation_input.grid(row=2, column=2,pady=10,padx=8)
sko_input= tk.Entry(my_frame,width=40, font=('Arial 8'))

```

```

sko_input.grid(row=2, column=3,pady=10,padx=8)
level_input= tk.Entry(my_frame,width=44, font=('Arial 8'))
level_input.grid(row=2, column=4,pady=10,padx=8)
level_low_input= tk.Entry(my_frame,width=43, font=('Arial 8'))
level_low_input.grid(row=2, column=5,pady=10,padx=8)
forecast_input= tk.Entry(my_frame,width=20, font=('Arial 8'))
forecast_input.grid(row=2, column=6,pady=10,padx=8)
x = 0
def do_calculs():
    global x, somme
    xo=valeur_actuelle_input.get()
    mo= moyenne_input.get()
    r=autocorrelation_input.get()
    so=sko_input.get()
    bo=level_input.get()
    xo1=float(xo)
    mo1=float(mo)
    r1=float(r)
    so1=float(so)
    bo1=float(bo)
    essai_ruy = mo1 - r1 * (xo1 - mo1)
    essai_1_ruy = bo1 - essai_ruy
    import math
    diviseur_ruy = so1 * math.sqrt(1 - r1 * r1)
    part1_ruy = (bo1 - essai_ruy) / diviseur_ruy
    part2_ruy = (-essai_ruy / diviseur_ruy)
    # calcul du fonction de Laplace
    from scipy.stats import norm
    Laplace_part1_ruy = norm.cdf(part1_ruy) - 0.5
    Laplace_part2_ruy = norm.cdf(part2_ruy) - 0.5
    probability_ruy = round(Laplace_part1_ruy - Laplace_part2_ruy, 2)
    risk_ruy = round(1 - probability_ruy, 2)
    de=xo1+mo1+r1+so1+bo1
    nb = float(de)
    somme= nb+2
    rx_output.insert(0, f' {risk_ruy}')
frame_2=LabelFrame(root_WIND)
frame_2.place(relx=0.5, rely=0.6, anchor=CENTER)
annonce=Button(frame_2, text='Выходные параметры',font=("Colonna
MT",15),bg="#12C81A",fg="#EBF1EB",command=do_calculs)
annonce.grid(row=4, column=3,pady=10,padx=8)

```

```
frame_3=LabelFrame(root_WIND)
frame_3.place(relx=0.5, rely=0.8, anchor=CENTER)
rx=Label(frame_3, text='Вероятность выхода за пределы :',font=("Colonna
MT",10),bg="#12C81A",fg="#EBF1EB")
rx.grid(row=6, column=5,pady=10,padx=8)
rx_output=tk.Entry(frame_3, width=22, font=('Arial 10'))
rx_output.grid(row=7, column=5,pady=10,padx=8)
root_WIND.mainloop()
```

## Реализация алгоритма геоинформационного веб-приложения

```

import pandas as pd
import json
import plotly.express as px # (version 4.7.0 or higher)
import plotly.graph_objects as go
from dash import Dash, dcc, html, Input, Output # pip install dash (version
2.0.0 or higher)
app = Dash(__name__)
with open('geoBoundaries-BDI-ADM1.geojson', 'r') as fp:
    jdata = json.load( fp)
print(jdata['features'][0].keys())
for f in jdata['features'][:5]:
    print(f['properties'])
state_id_map = { }
for feature in jdata["features"]:
    feature["id"] = feature["properties"]["shapeISO"]
    state_id_map[feature["properties"]["shapeName"]] = feature["id"]
df = pd.read_csv("rain_risk_2013.csv")
df = df.groupby(['Level','shapeName','Parametre'])[['Value']].mean()
df.reset_index(inplace=True)
df["id"] = df["shapeName"].apply(lambda x: state_id_map[x]) #peut etre c'est
pas la bonne place
print(df[:5])
app.layout = html.Div([
    html.H1("Геоинформационная модель", style={ 'text-align': 'center' }),
    dcc.Dropdown(id="slct_level",
        options=[
            {"label": "30", "value": 30},
            {"label": "40", "value": 40},
            {"label": "50", "value": 50},
            {"label": "60", "value": 60}],
        multi=False,
        value=30,
        style={ 'width': "30% " }
    ),
    html.Div(id='output_container', children=[]),
    html.Br(),
    dcc.Graph(id='elias_map', figure={ })

```



```

])
@app.callback(
    [Output(component_id='output_container', component_property='children'),
     Output(component_id='elias_map', component_property='figure')],
    [Input(component_id='slct_level', component_property='value')]
)
def update_graph(option_slctd):
    print(option_slctd)
    print(type(option_slctd))
    container = "Выберите уровень количества осадков на которой вы
хотите оценить ущерб: {}".format(option_slctd)
    dff = df.copy()
    dff = dff[dff["Level"] == option_slctd]
    dff = dff[dff["Parametre"] == "Damage"]
    fig = px.choropleth_mapbox(dff,
                              geojson=jdata,
                              locations='id',
                              color='Value',
                              hover_name="shapeName",
                              hover_data=["Value",'shapeName'],
                              color_continuous_scale='inferno',#rnylbu #brbg
                              range_color=(0, 1),
                              mapbox_style="carto-positron",
                              zoom=7.7, center={"lat": -3.3, "lon": 30},
                              height=750,
                              template='plotly_dark'

                              )
    return container, fig
if __name__ == '__main__':
    app.run_server(debug=True)

```

## Пространственное распределение коэффициентов рисков

Геоинформационная модель

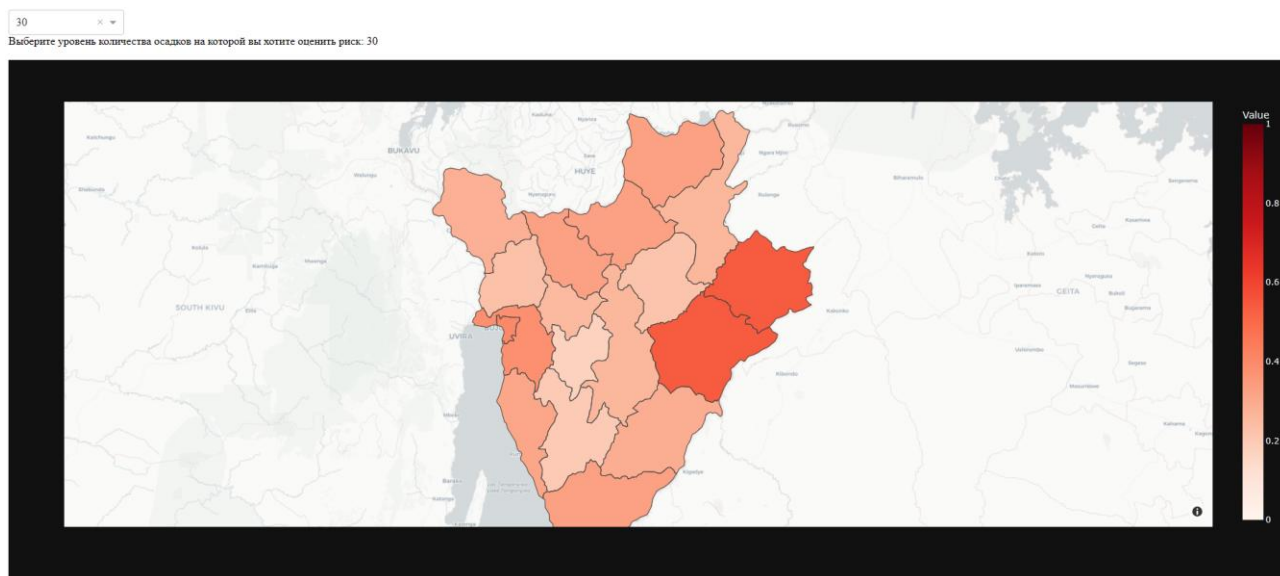


Рис. Г.1. Пространственное распределение коэффициента риска в марте 2013 г. с учетом суточного количества осадков, превышающего 30мм.

Геоинформационная модель

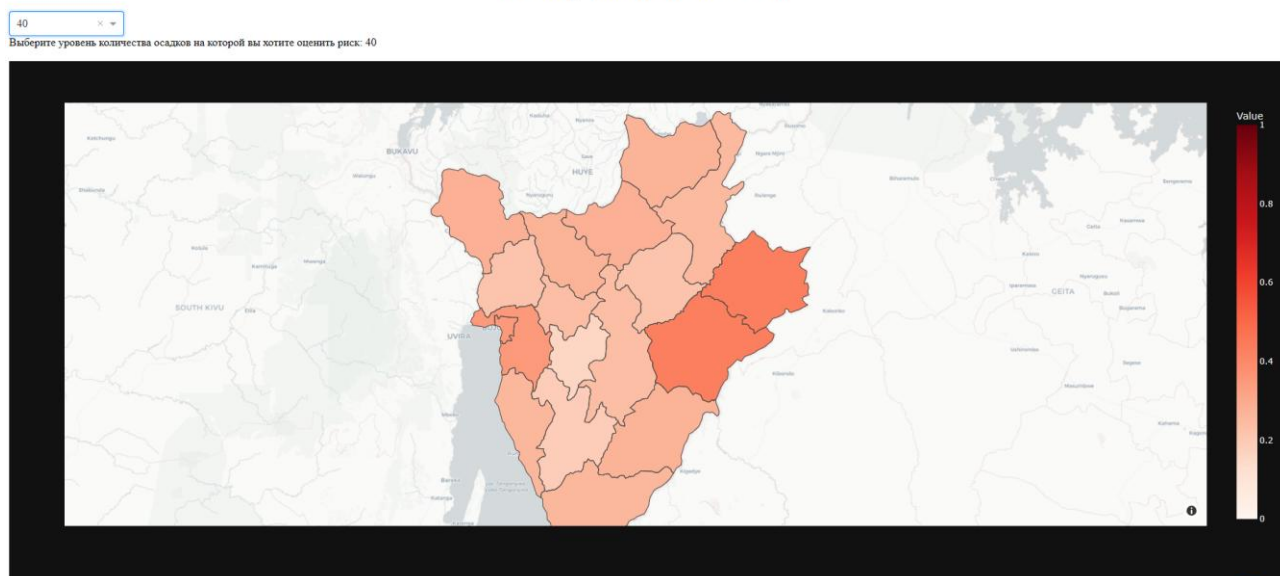


Рис. Г.2. Пространственное распределение коэффициента риска в марте 2013 г. с учетом суточного количества осадков, превышающего 40мм.

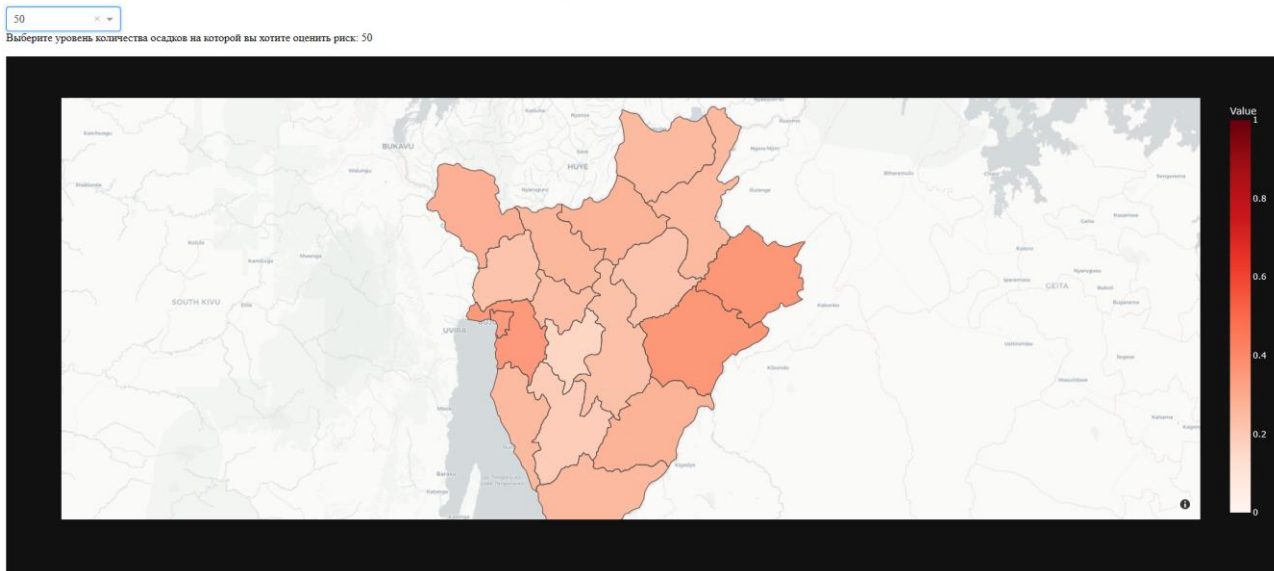


Рис. Г.3. Пространственное распределение коэффициента риска в марте 2013 г. с учетом суточного количества осадков, превышающего 50мм.

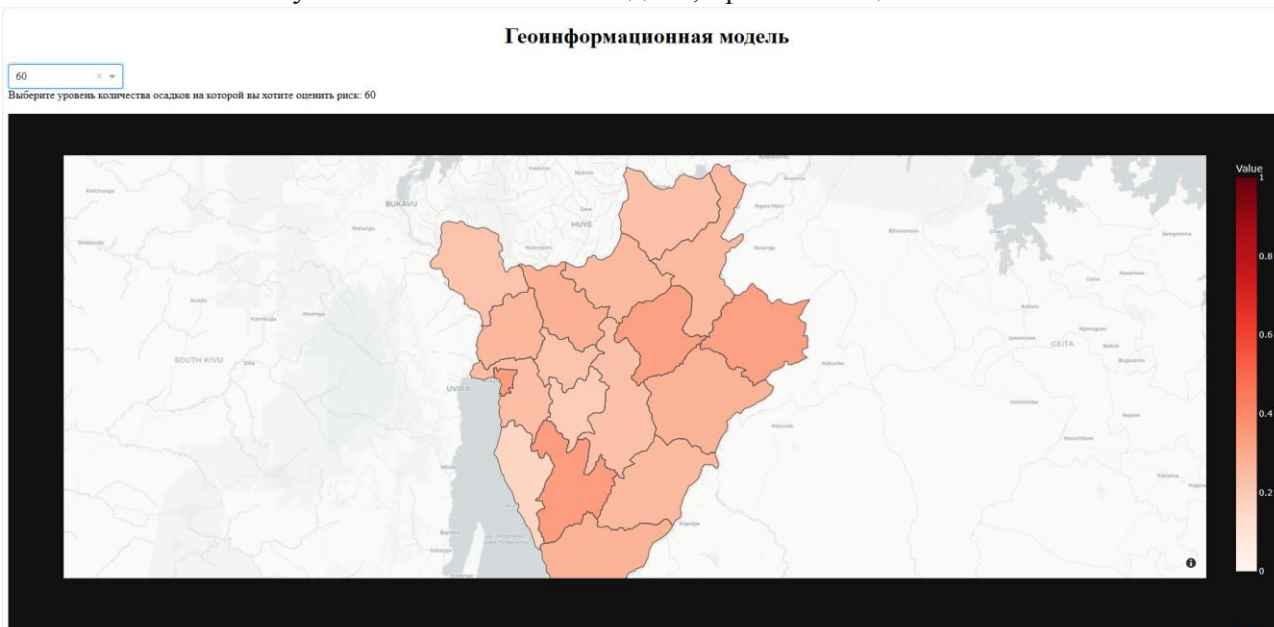


Рис. Г.4. Пространственное распределение коэффициента риска в марте 2013 г. с учетом суточного количества осадков, превышающего 50мм

## Приложение Д

### Проверка стационарности временных рядов температур и количества осадков

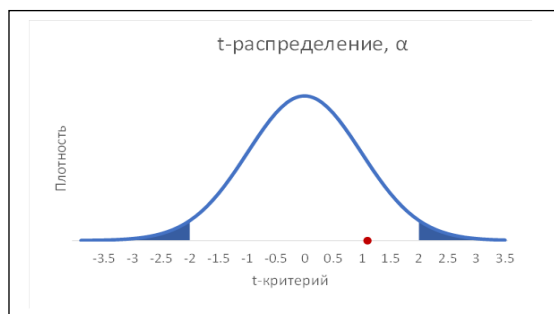


Рис.Д.1. t-распределение в Кирундо по температуре (февраль 2013 г.)

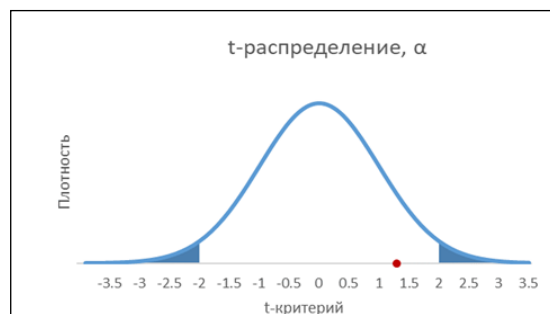


Рис. Д.2. t-распределение в Гитега по данным количества осадков (апрель 2014 г.)



Рис.Д.3. t-распределение в Муйинга по данным температуры (февраль 2010 г.)

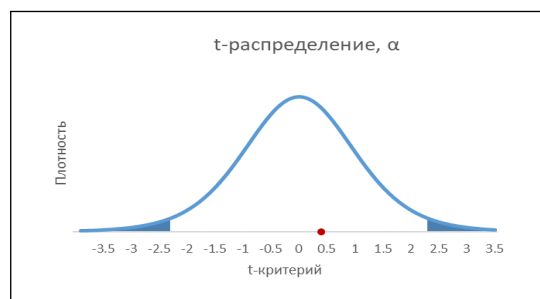


Рис.Д.4. t-распределение в Карузи по данным температуры (сентябрь 2019 г.)

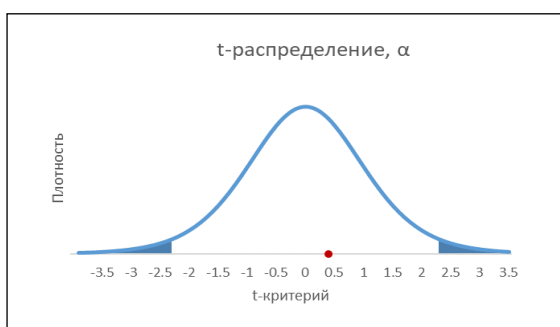


Рис. Д.5. t-распределение в Руйиги по данным количества осадков (октябрь 2015 г.)

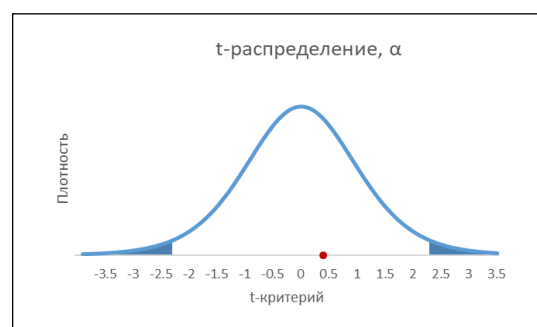


Рис.Д.6. t-распределение в Буруры по данным температуры (апрель 2017 г.)

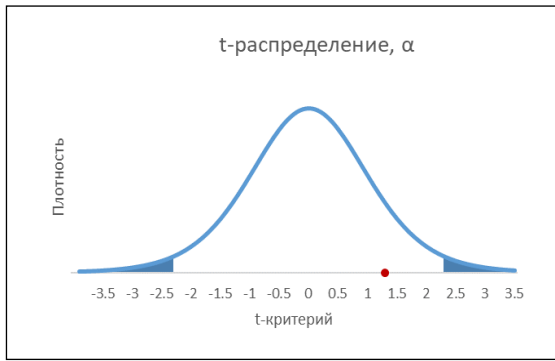


Рис. Д.7. t-распределение в Каянза по данным температуры (март 2011 г.)

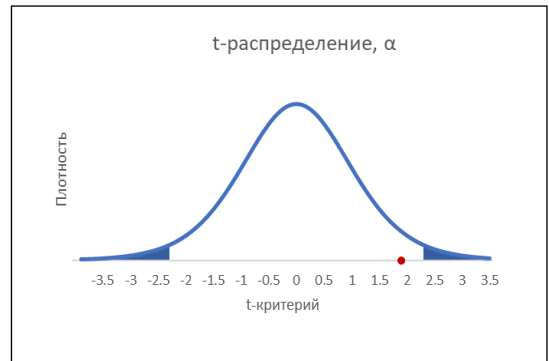


Рис.Д.8. t-распределение в Мваро по данным количества осадков (октябрь 2014 г.)

**Проверка стационарности временных рядов температур и количества осадков**

Bi	P(Tz/Xo)	R(Tz/Xo)	Dr	Ku
25	0.00588111	0.99411889		0.492601
27	0.512638653	0.487361347	0.506757543	0.291207
29	0.995096631	0.004903369	0.989215521	0
31	0.999999858	1.42236E-07	0.994118748	0

Рис.Е.1. Пример полученных результатов при применении модели для данных температур, полученных со станции Гитега по данным сезона С (2011 г.)

Bi	P(Tz/Xo)	R(Tz/Xo)	Dr	Ku
25	0.018655724	0.981344276		0.504412
27	0.201501918	0.798498082	0.182846194	0.41994
29	0.659024632	0.340975368	0.640368908	0.4
31	0.951126313	0.048873687	0.932470589	0.5

Рис.Е.2. Пример полученных результатов при применении модели для данных температур, полученных со станции Нгози по данным сезона В (2010 г.).

Bi	P(Tz/Xo)	R(Tz/Xo)	Dr	Ku
25	0.07312	0.92688		0.542334
27	0.292627	0.707373	0.219507	0.456522
29	0.641132	0.358868	0.568012	0.355556
31	0.897726	0.102274	0.824606	1

Рис.Е.3. Пример полученных результатов при применении модели для данных температур, полученных со станции Макамба по данным сезона А (2016 г.).

P(t3/Xo)	B	P	R	dR
1	10	0.481594	0.518406	
2	20	0.627232	0.372768	0.145638
3	40	0.635784	0.364216	0.15419
4	50	0.635784	0.364216	0.15419

Рис. Е.4. Пример полученных результатов при применении модели для данных осадков, полученных со станции Бужумбура по данным сезона В (2013 г.).

P(t3/Xo)	B	P	R	dR
1	10	0.433288	0.566712	
2	20	0.666521	0.333479	0.233234
3	40	0.706649	0.293351	0.273362
4	50	0.706676	0.293324	0.273388

Рис.Е.5. Пример полученных результатов при применении модели для данных осадков, полученных со станции Гитега по данным сезона В (2015 г.).

Bi	P(Tz/Xo)	R(Tz/Xo)	Dr	Ku
25	0.000000E+00	1		0.590403
27	0.013518654	0.986481346	0.013518654	0.458275
29	0.256440272	0.743559728	0.256440272	0.353303
31	0.816540816	0.183459184	0.816540816	0.411765

Рис.Е.6. Пример полученных результатов при применении модели для данных температур, полученных со станции Бужумбура по данным сезона С (2012 г.).